

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра механічної та електричної інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

магістр

на тему: **«Обґрунтування та оптимізація параметрів пристрою для сортування качанів кукурудзи»**

КРМ.133ГМмд(ОНП)_21.20.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за міждисциплінарною освітньо-
науковою програмою *«Сервісна
інженерія в агропромисловому
виробництві» спеціальностей
133 «Галузеве машинобудування»,
208 «Агроінженерія»*
ступеня вищої освіти магістр
групи *133ГМмд(ОНП)_21*
СОЛОДОВНИК Анатолій

Керівник: канд. техн. наук, доцент
КАНІВЕЦЬ Олександр

Полтава – 2026 року

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра механічної та електричної інженерії

Міждисциплінарна освітньо-наукова програма

«Сервісна інженерія в агропромисловому виробництві»

Спеціальності: 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія»

Ступінь вищої освіти *магістр*

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри механічної
та електричної інженерії,**

канд. техн. наук, доцент,

_____ Станіслав ПОПОВ

30 червня 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

СОЛОДОВНИК Анатолій

1. Тема роботи: *«Обґрунтування та оптимізація параметрів пристрою для сортування качанів кукурудзи»*,

керівник роботи **канд. техн. наук, доцент КАНІВЕЦЬ Олександр**,

затверджено засіданням кафедри, протокол №18 від 30.06.2025 р.

2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи – 20 травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: *аналіз літературних джерел Полтавської обласної універсальної наукової бібліотеки імені Івана Котляревського; аналіз літературних джерел Національної бібліотеки України імені Володимира Вернадського; сучасний досвід підприємств машинобудування та АПК за тематичним спрямуванням.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Розділ 1. Аналіз існуючих досліджень.

Розділ 2. Теоретичні положення.

Розділ 3. Методика досліджень.

Розділ 4. Результати експериментів.

Розділ 5. Практична реалізація розробок.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу: *титольний аркуш; назва теми, мета і задачі дослідження; огляд літературних джерел; теоретичні положення; методика досліджень (моделі, плани експериментів, перевірка адекватності математичних моделей); результати експериментальних досліджень; висновки.*

6. Консультанти розділів *кваліфікаційної роботи*

Розділ	Власне ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання отримав
Практична реалізація розробок	Володимир ДУДНИК, доцент кафедри механічної та електричної інженерії		
	Петро МАКАРЕНКО, професор кафедри економіки та публічного управління		
	Павло ПИСАРЕНКО, завідувач кафедри екології, збалансованого природокористування та захисту довкілля		

7. Дата видачі завдання 30 червня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з.п.	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір і затвердження теми роботи	До 30.06.25	
2	Складання і затвердження розгорнутого плану та завдання на кваліфікаційну роботу	21.07-27.07.25	
3	Опрацювання літературних джерел	15.12-28.12.25	
4	Збір, вивчення і обробка інформації, необхідної для виконання роботи	20.04-26.04.26	
5	Виконання розділів роботи	27.04.26-10.05.26	
6	Оформлення тексту роботи		
7	Попередній захист роботи на кафедрі	11.05-15.05.26	
8	Доопрацювання роботи з урахуванням зауважень і пропозицій	18.05-20.05.26	
9	Нормалізаційний контроль		
10	Захист кваліфікаційної роботи	25.05-31.05.26	

Здобувач вищої освіти _____ Анатолій СОЛОДОВНИК
(підпис)

Керівник роботи _____ Олександр КАНІВЕЦЬ
(підпис)

РЕЗЮМЕ

Пояснювальна записка: 5 розділів, 44 рисунки, 2 таблиці, 35 використаних джерел, 82 сторінки.

Об'єкт розробки – процес сортування кукурудзяних качанів на очищені та неочищені, а також технічні засоби для його здійснення.

Предмет розробки – закономірності впливу конструктивних, біометричних та фізико-механічних характеристик на процес сортування качанів кукурудзи.

Мета кваліфікаційної роботи – підвищення продуктивності та зниження витрат ручної праці під час сортування кукурудзяних качанів насінневої кукурудзи шляхом оптимізації параметрів і режимів роботи установки зі змінною кривизною робочої поверхні.

Практичне значення кваліфікаційної роботи полягає у розробці конструктивно-технологічної схеми установки для сортування качанів насінневої кукурудзи, аналітичних залежностей процесу розділення на ній очищених і неочищених качанів, методики контролю ступеня очищеності качанів від обгортки за кодами забарвлення їх поверхні та визначення впливу конструктивно-режимних параметрів розробленої установки на розділення очищених і неочищених качанів.

У **першому розділі** проведено комплексний аналіз існуючих досліджень біометричних та фізико-механічних властивостей качанів кукурудзи, розглянуто сучасні технології й технічні засоби післязбиральної обробки та сортування насінневої кукурудзи, а також виконано огляд теоретичних досліджень, пов'язаних із процесами очищення, сепарації та фотосортування качанів. На основі аналізу наукових праць і сучасних технічних рішень визначено основні недоліки наявних систем сортування, обґрунтовано доцільність використання установки зі змінною кривизною робочої поверхні та системою кольорового розпізнавання, сформульовано робочу гіпотезу, мету дослідження та основні завдання роботи.

У **другому розділі** обґрунтовано конструктивно-технологічну схему установки для сортування качанів кукурудзи на очищені та неочищені з використанням поверхні змінної кривизни та системи кольорового розпізнавання. Проведено теоретичні дослідження процесу переміщення качанів по робочих поверхнях установки, визначено умови їх безпечного перевантаження,

закономірності кочення по похилих і криволінійних поверхнях, а також вплив коефіцієнтів тертя, шорсткості та кута нахилу поверхонь на швидкість і дальність перекочування. Отримано математичні залежності для розрахунку динамічних і конструктивних параметрів установки, обґрунтовано використання RGB-методу для ідентифікації качанів за кольоровими характеристиками зерен та обгортки і визначено параметри розміщення оптичного датчика контролю ступеня очищення качанів.

У **третьому розділі** розроблено програму та методику експериментально-лабораторних і польових досліджень процесу сортування качанів кукурудзи. Проведено вибір гібридів кукурудзи для досліджень, визначено методики вимірювання їх біометричних і фізико-механічних властивостей, а також описано лабораторні установки для дослідження процесів перекочування качанів по поверхні змінної кривизни та сортування за кольоровими тонами. Розроблено методику RGB-розпізнавання очищених і неочищених качанів за кольоровими характеристиками зерен та обгортки, проведено підготовку зразків із різним ступенем очищення та обґрунтовано вибір синього кольору як найбільш інформативного для ідентифікації. Також описано методику польових досліджень установки для сортування качанів, методи обробки експериментальних даних і планування експерименту для визначення оптимальних параметрів роботи розділювача.

У **четвертому розділі** наведено результати експериментально-лабораторних і польових досліджень процесу сортування качанів кукурудзи за ступенем очищення від обгортки. Досліджено біометричні та фізико-механічні властивості качанів різних гібридів, визначено їх масові, геометричні та фрикційні характеристики, що реалізують на процес перекочування та сортування. Встановлено закономірності руху качанів по похилій поверхні залежно від кута нахилу початкової швидкості та коефіцієнта кочення. Проведено аналіз RGB-кодів кольорості очищених і неочищених качанів та обґрунтовано використання синього кольорового каналу для їх розпізнавання. Отримано емпіричні залежності виділення неочищених качанів на лабораторній і польовій установках, підтверджено адекватність математичних моделей та визначено оптимальні параметри процесу сортування

методом планування експерименту. Також визначено раціональне розташування оптичного датчика для контролю ступеня очищення качанів у процесі автоматизованого сортування.

У **п'ятому розділі** наведено практичну реалізацію розробленої установки для сортування качанів насінневої кукурудзи, виконано аналіз умов охорони праці та виробничих ризиків під час роботи сортувальних ліній зокрема впливу шуму, пилу, вібрації, ергономічних і механічних факторів, а також запропоновано заходи щодо підвищення безпеки праці операторів. Проведено екологічну експертизу установки, у ході якої встановлено, що розроблений пристрій характеризується мінімальним негативним впливом на атмосферне повітря, ґрунт і водні ресурси, не створює небезпечних викидів та забезпечує можливість екологічно безпечної утилізації відходів сортування. Також виконано економічну оцінку ефективності впровадження установки порівняно з існуючим обладнанням, у результаті чого встановлено зниження експлуатаційних витрат на 42,82 %, підвищення продуктивності праці на 40,4 % та визначено термін окупності додаткових капіталовкладень на рівні 4,87 року.

Результати роботи рекомендовано використовувати під час проектування та впровадження технологічних ліній сортування качанів насінневої кукурудзи для підвищення якості очищення, автоматизації процесу розпізнавання неочищених качанів і зниження експлуатаційних витрат у насінницьких господарствах.

Сфера застосування результатів роботи результати роботи можуть бути застосовані в насінницьких господарствах, агропромислових підприємствах, на кукурудзообробних заводах і в науково-дослідних установах для вдосконалення процесів сортування та контролю якості очищення качанів насінневої кукурудзи, а також під час розроблення автоматизованих сортувальних систем.

Ілюстраційна частина кваліфікаційної роботи – 12 аркушів.

Результат перевірки тексту пояснювальної записки на плагіат за допомогою сервісу StrikePlagiarism: унікальність тексту – 98,25 %.

АНОТАЦІЯ

У роботі досліджено процес сортування качанів насінневої кукурудзи за ступенем очищення від обгортки та розроблено установку з оптичним розпізнаванням качанів за кольоровими кодами. Проведено аналіз фізико-механічних властивостей качанів, досліджено закономірності їх руху по похилій поверхні, визначено оптимальні параметри процесу сортування та обґрунтовано конструктивні параметри установки. Виконано лабораторні й польові дослідження, які підтвердили ефективність виділення неочищених качанів, а також проведено оцінку умов охорони праці, екологічного впливу та економічної ефективності розробки. Встановлено, що впровадження установки забезпечує підвищення продуктивності процесу сортування та зниження експлуатаційних витрат.

НАСІННЄВА КУКУРУДЗА, СОРТУВАННЯ КАЧАНІВ, ОПТИЧНЕ РОЗПІЗНАВАННЯ, ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ПОХИЛА ПОВЕРХНЯ, КОЕФІЦІЄНТ ТЕРТЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ СОРТУВАННЯ, КОЛЬОРОВІ КОДИ, ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ.

ANNOTATION

This master's thesis investigates the process of sorting seed maize cobs according to the degree to which they have been stripped of their husks and develops a system for optically recognising cobs using colour codes. An analysis of the physical and mechanical properties of the cobs was carried out, the patterns of their movement along an inclined surface were investigated, the optimal parameters of the sorting process were determined, and the design parameters of the system were justified. Laboratory and field studies were carried out, confirming the effectiveness of separating unhusked cobs, and an assessment was made of occupational health and safety conditions, environmental impact and the economic efficiency of the design. It was established that the implementation of the system ensures an increase in sorting process productivity and a reduction in operating costs.

SEED MAIZE, COB SORTING, OPTICAL RECOGNITION, PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES, INCLINED SURFACE, COEFFICIENT OF FRICTION, AUTOMATED SORTING, COLOUR CODES, EXPERIMENTAL DESIGN.

ЗМІСТ

Вступ	11
Розділ 1 Аналіз існуючих досліджень	14
1.1 Аналіз біометричних та фізико-механічних властивостей качанів кукурудзи.....	14
1.2 Аналіз способів і засобів післязбиральної обробки качанів насінневої кукурудзи.....	16
1.3 Огляд теоретичних досліджень.....	22
1.4 Мета та завдання дослідження.....	24
Розділ 2 Теоретичні положення	26
2.1 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми установки для сортування качанів кукурудзи.....	26
2.2 Визначення безпечних умов розміщення качанів на робочу поверхню.....	27
2.3 Кочення качана по поверхні зі змінною кривизною.....	33
2.4 Вибір коду забарвлення для сортування качанів у обгортках та без обгортки.....	42
2.5 Розрахунок параметрів місця розташування оптичного датчика.....	43
Розділ 3 Методика дослідження	46
3.1 Методика визначення біометричних та фізико-механічних властивостей качанів, що впливають на умови їх сортування.....	46
3.2 Методика дослідження сортування качанів за кольоровими кодами.....	50
3.3 Методика польових досліджень.....	53
Розділ 4 Результати експериментів	54
4.1 Результати дослідження біометричних та фізико-механічних властивостей качанів, що впливають на умови їх сортування.....	54
4.2 Результати дослідження руху качанів кукурудзи по похилій площині.....	57
4.3 Сортування качанів за кодами кольору.....	61
4.4 Експериментально-лабораторні дослідження сортування качанів.....	64
4.5 Польові дослідження сортування качанів.....	66

4.6 Уточнення основних параметрів установки для сортування катанів методом планування експерименту.....	67
4.7 Визначення положення оптичного датчика.....	71
Розділ 5 Практична реалізація підготовки.....	73
5.1 Охорона праці.....	73
5.2 Економічна експертиза.....	75
5.3 Економічна ефективність розробки.....	78
Висновки.....	81
Список використаних джерел.....	83

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. У технологіях очищення та переробки насінневої кукурудзи одними з основних є операції зняття оболонки, розділення куща на очищені та неочищені качани, доочищення та обмолоту. При цьому продуктивність серійних очищувачів розрахована на досить великі потоки (починаючи від 500-700 кг/год на пару очисних валців), а ступінь очищення відрізняється нестабільністю (70-90%) [1].

Сформована практика конструювання та використання комбайнів і стаціонарних установок з елементами комбайнів, що виключає операції очищення та сортування, орієнтована на отримання товарного зерна та великих потоків насінневого зерна. При цьому всі без винятку технологічні лінії післязбиральної обробки кукурудзяних качанів та насіння оснащені перебіральними столами або транспортерами різних конструкцій для роботи на яких застосовується виключно ручна праця.

Необхідність розробки принципово нових технічних рішень для процесів сортування качанів кукурудзи, обґрунтованих теоретично та заснованих на більш глибокому дослідженні біометричних і фізико-механічних властивостей оброблюваного рослинного матеріалу, є очевидною та актуальною.

Мета дослідження – підвищення продуктивності та зниження витрат ручної праці під час сортування куща качанів насінневої кукурудзи шляхом оптимізації параметрів і режимів роботи установки зі змінною кривизною робочої поверхні.

Об'єкт дослідження – процес сортування кукурудзяних качанів на очищені та неочищені, а також технічні засоби для його здійснення.

Предмет дослідження – закономірності впливу конструктивних, біометричних та фізико-механічних характеристик на процес сортування качанів кукурудзи.

Завдання дослідження.

1 На основі аналізу існуючих на сьогодні технологій та засобів механізації для сепарації качанів кукурудзи розробити конструктивно-технологічну схему установки для їх сортування на очищені та неочищені.

2 Теоретично обґрунтувати, дослідити та оптимізувати процес взаємодії початків кукурудзи з робочою поверхнею змінної кривизни сортувальної установки.

3 Розробити методіку розпізнавання очищених і неочищених качанів за кольоровими кодами.

4 Експериментально дослідити процес сортування качанів на установці з робочою поверхнею змінної кривизни та кодовим розпізнаванням залежно від ступеня очищення.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження проведено з використанням класичних положень теоретичної механіки, аналітичної геометрії та математичного аналізу. Для аналізу результатів використано теорію математичної статистики та сучасні методи обробки вихідної інформації.

Наукову новизну роботи становлять:

- аналітичні залежності процесу сортування від початкової швидкості кочення качанів по похилій частині робочої поверхні установки, кута нахилу висхідної частини робочої поверхні установки та кута охоплення качана обгортковими листками;
- математична модель у вигляді рівняння регресії для вибору оптимальних параметрів установки для сортування насінневої кукурудзи;
- методика автоматичного контролю кольорів для сортування очищених та неочищених качанів.

Теоретичне та практичне значення результатів дослідження полягає у розробці конструктивно-технологічної схеми установки для сортування качанів насінневої кукурудзи, аналітичних залежностей процесу розділення на ній очищених і неочищених качанів, методіки контролю ступеня очищеності качанів від обгортки за кодами забарвлення їх поверхні та визначення впливу конструктивно-режимних параметрів розробленої установки на розділення очищених і неочищених качанів.

На заміст висуваються такі основні положення:

- конструктивно-технологічна схема установки для сортування качанів насінневої кукурудзи;
- математична модель сортування качанів насінневої кукурудзи на установці з поверхнею змінної кривизни та автоматичним контролем кодів забарвлення;
- результати експериментальних досліджень біометричних та фізико-механічних властивостей качанів кукурудзи, процесу перекошування качанів на похилій поверхні зі змінною кривизною під час їх розпізнавання за кодом забарвлення на очищені та неочищені;
- результати польових досліджень установки для сортування качанів насінневої кукурудзи з кодським розпізнаванням забарвлення качанів; оптимізація її параметрів методом планування експерименту та методика їх інженерного розрахунку; порівняльна техніко-економічна оцінка ефективності установки.

Обсяг і структура роботи. Робота складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку літератури, що містить 25 найменувань. Робота викладена на 82 сторінках комп'ютерного тексту і містить 44 рисунка та 2 таблиці.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Аналіз біометричних та фізико-механічних властивостей качанів кукурудзи

Дослідження біометричних (до яких входять деякі морфологічні та розмірно-масові характеристики) і фізико-механічних (до яких входять показники міцності, коефіцієнти тертя та ін.) властивостей качанів кукурудзи є невід'ємною умовою при розробці конструкцій та визначенні параметрів робочих органів апаратів і машин для збирання та післязбиральної обробки. Наразі прийнята розмірна характеристика сортів та гібридів кукурудзи, що включає чотири показники качана: довжину, діаметр, масу та масу 1000 зерен [2]. Ці показники або їх частини зазвичай включаються до досліджень фізико-механічних властивостей качанів.

Оптимальні характеристики качанів, придатних для механізованого збирання: 1) приблизно однакова товщина по всій довжині; 2) легке звуження до верхівки качана; 3) співвідношення довжини качана до його окружності на відстані 1/3 від основи 4:3; 4) ряди зерен рівні, без тислого прилягання і без сильного розсунення; 5) стрижень качана середній з глибоко сидячими зернами; 6) зерно в 1,5 рази більше за довжиною, ніж за шириною, і однакової товщини [3].

Дані по вивченню біометричних і фізико-механічних властивостей кукурузи представлені у роботах М.Ф. Бурмістрова, А.І. Буянов, М.І. Гуров, В.В. Деревенко, І.Т. Осмак, А.Ф. Соколов, М.М. Шатілов, Г.І. Крейперман, М.Г. Голік, В.С. Кравченко, В.С. Курасов, Ю.І. Мозговий, Г.А. Нікітіна, А.І. П'янков, А.І. Гокоев, Т.К. Тогонбаєв, В.Ф. Раздорський, М.М. Ульріх, В.Г. Івашков, Є.В. Труфляк, С. Расієв, А. Мітков, U.C. Arazodo, A. Brandolini, F. Hamid, R. Laubengayer, J. Moser, A. Srivastava.

Властивості різних поверхонь качана характеризують коефіцієнти тертя спокою та руху:

– значення коефіцієнтів тертя при русі обгортки з вологістю 15% становили 0,25 для сталі та фанери з сосни і 0,82 для технічної гуми, а при вологості 54% – 0,27-0,4 для сталі, 0,3 для фанери та 0,87 для гуми,

– коефіцієнти тертя в стані спокою між оборотками становили 0,35, між оборотками та сталлю – 0,84-0,34 (зменшуються із зниженням вологості від 63 до 14 %);

– коефіцієнти тертя при русі зерна повної стиглості з вологістю 15 % становили 0,24 для фанери, 0,21 і 0,33 – для листової та оцинкованої сталі, 0,54 – для технічної гуми. Показники тертя спокою зерна по оборотці становили 0,29, зерна по дереву – 0,36 (зменшуються із зменшенням вологості)

– при вологості 15% у повній фазі стиглості коефіцієнти тертя спокою зерна по фанері дорівнювали 0,32, по листовій та оцинкованій сталі 0,64 і 0,53, по гумі 0,66 [4].

Встановлено, що зміна зернин кукурудзи стисненню залежить від місця та напрямку прикладання сили і зростає із збільшення ступеня стиглості. Цілий качан кукурудзи має високий опір стисненню, якщо статичне навантаження спрямовано радіально. Стискання стиглого качана сталевими пластинками силою до 0,5 кН не пошкоджує зерна і не викликає залишкової деформації, силою в 1 кН – викликає видавлювання окремих зерен і залишкову деформацію, силою в 2 кН – розколює качан. Поздовжнє стискання зусиллям 1,2 – 1,5 кН забезпечує початок відмолоту стиглого зерна [5].

Значення зусиль, необхідних для вилучення одного зерна, залежать від вологості стиглого зерна. Вони збільшувалися при висмикуванні від 15,7–20,6 Н для вологості 35–18 % до 23,6 Н для вологості 15 % і зменшувалися при викорчовуванні від 6,9–7,8 Н при вологості 35–18 % до 5,9 Н при вологості 15 %.

Спектр досліджених та узагальнених показників біометричних і фізико-механічних властивостей постійно розширюється та доповнюється. Це зумовлено: мінливістю показників рослинних об'єктів, пов'язаною з об'єктивними причинами (нетипові сезони за температурою, кількістю опадів тощо):

– появою нових сортів і гібридів, біометричні властивості яких завдяки досягненням сучасної генетики максимально наближені до змог масової механізованої обробки;

– досягненнями в галузі сучасної електроніки, які ще 10–15 років тому не розглядалися для застосування в сільському господарстві.

У результаті переробки відбуваються зміни в анатомічній структурі, розмірно-масових та фізико-механічних показниках заготовок. Тому їхні властивості досліджують у динаміці відповідного процесу з урахуванням конструктивних рішень.

1.2 Аналіз способів і засобів післязбиральної обробки качанів насінневої кукурудзи

Насінневу кукурудзу збирають після досягнення повної стиглості, у фазі кінця воскової – початку повної стиглості, і в максимально короткі терміни. Тривалість збирання одного гібрида становить 5-7 днів [6].

Збирання кукурудзи в качанах на насіння починають при вологості зерна 28 – 35%. Сучасна технологія «поле-завод» передбачає збирання врожаю насінневої кукурудзи в качанах кукурудзозбиральними комбайнами з одночасним очищенням основної маси качанів у полі та доочищенням їх на качан-очисній лінії підприємства або в обгортках.

Під час збирання кукурудзи з очищенням повного збору качанів має становити не менше 98,5%, ступінь очищення качанів від обгортки не менше 95%, чистота кули качанів не менше 99,7%, вилущування зерна не більше двох відсотків, пошкодження зерен у качанах не більше одного відсотка, поламаних стрижнів качанів не більше двох відсотків [7].

Очищення насінневої кукурудзи вимагає повного видалення обгорткових листків, при цьому може залишатися один листок, що покриває качан на 12-15 % поверхні. Очищеними також звважаються качани насінневої кукурудзи, на яких є не більше одного обгорткового листка [8].

Зародки з рядків материнських форм збирають переважно вручну, виламуючи їх з оболонки або зриваючи зі стебла рослини разом з оболонкою, після чого протягом дня їх очищають від оболонки та сортують.

Оскільки втрати качанів під час комбайнового збирання становлять від 5 до 7 %, механізований метод застосовують лише на ділянках гібридизації з розмноженням насіння подвійних міжлінійних гібридів.

Параметри лінії обробки значною мірою залежать від режиму її роботи, який визначається кількістю та якістю матеріалу, що надходить на доопрацювання. Неочищені качани, доставлені з комбайнів, обробляють з очищенням на поточкових механізованих лініях; з обмолотом на стаціонарі, обладнаному поточковими лініями, сконструйованими з кукурудзяних молотилок [9].

Принцип роботи технологічних ліній комплексів попереднього очищення з використанням очисних апаратів комбайнів полягає у наступному: доставлені від комбайнів тракторними в'язками качани зважувалися і розвантажувалися в бурт на майданчик перед дозаторами, звідки подавалися похилими дошками на очищувач качанів, а потім на ручну доробку і повторне очищення. Продуктивність становить 12-15 т/год.

У поточковій лінії очищення качанів на базі переобладнаного напівпричепарозкидача ПРТ-10 та очисника ОП-15С застосовувалася ручна праця та повторна доочистка. Продуктивність лінії становила 9-10 т качанів за годину робочого часу.

Завод ТОВ «Гібрид СК», спроектований інститутом HYBRID ENGINEERING (США) і побудований європейською компанією ІС ПЛАНТ, працює за такою схемою: Кукурудза надходить у качанах, зважується і на розвантажувальній платформі звантажуються у приймальний ковш. Потім через вібростоли качани надходять на похилий транспортер з магнітом для видалення металевих предметів. Далі качани надходять на луцильник, а потім стрічковим транспортером на столи перебирання, де робітники відбирають неочищені, які повертаються на повторне очищення, пошкоджені та некондиційні. Наступними етапами є сушіння, обмолот і обробка зерна. Продуктивність системи луцення та перебирання становить до 30 т/год [10].

Лінія з переробки кукурудзи, створена у співпраці Німеччини та Угорщини, здійснює обробку насінневих качанів практично за аналогічною схемою. З приймального бункера вібророзподільником качани подаються на завантажувальні транспортери, потім на 12-рядний луцильник оболонки. Після цього на

інспекційному транспортері з параметрами довжини 6,8 м і ширини 0,6 м вручну виконується перебирання та вибракування. За продуктивністю можна порівняти з попередньою лінією [11].

В Україні досить широкого поширення набули міні-заводи [12]. Це пояснювалося тим, що в умовах великого заводу не просто врахувати особливості обробки насіння окремих гібридів та їх батьківських компонентів. Найважливішою особливістю комплексу є те, що він спроектований на модульній основі, тобто з можливістю поступового нарощування потужності та розширення технологічних операцій. Передбачено три схеми модульної побудови та комплектації комплексу – базова, скорочена та повна. Базова схема включає технологічні операції: прийому та доопрацювання качанів, їх сушіння та обмолоту, первинного очищення зерна. Усі операції виконуються в потіці з збиранням, що дозволяє виключити зберігання вологої кукурудзи на майданчиках, а очищене зерно доопрацьовують на іншому обладнанні, що не входить до складу комплексу.

У Сероті експлуатується лінія з переробки качанів насінневої кукурудзи «METALAC 2» [13]. У технологічний процес включені очисники-лушпильники (кількість яких може варіюватися) продуктивністю 5,5-7,5 т/год і стрічкові транспортери (з кількістю робочих місць від 3 до 5) для сортування потоку перероблених качанів.

Операції з очищення від обліткових листків та відбракування качанів, як відомо, зберігаються на першому етапі селекції та у первинному насінництві. Якщо обсяг виробництва перевищує кілька сотень кілограмів, використовують очищувачі качанів типу ОП-15. Партії обсягом від одного до кількох сотень качанів обробляють вручну. Науково-дослідні та дослідно-конструкторські розробки не привели до випуску вітчизняних серійних машин, але такі роботи тривають.

Так серійно випускається машина для очищення качанів Tonga французької фірми Bourgois, що має компактні розміри (2180 * 1200 * 1050 мм), обладнана трьома парами валів з чотирма рядами притискних барабанів, а також очищувач качанів кукурудзи Zhengzhou Shuli Machine китайського виробництва (потужністю

3 кВт, продуктивністю 1000 – 3000 кг/год, габаритними розмірами 1250 * 900 * 1250 мм і вагою 80 кг) забезпечують параметри очищення на рівні СП-15 [14].

Наразі сортування за допомогою фото- та лазерних технологій є пріоритетним для плодів, овочів та насінневої продукції. Його застосовують практично всі провідні фірми-розробники, що пояснюється двома основними факторами. По-перше, досягненнями селекціонерів, які отримують різні об'єкти широкої колірної гами, зокрема кукурудзу з зерновками від світло-жовтого до практично чорного кольору, а також вирівняні за розмірними характеристиками. По-друге, рівнем досконалості фото- та кінокамер лазерних, світлодіодних і сенсорних датчиків, а також усієї електронної продукції загалом, що дозволяє здійснювати зйомку об'єктів на будь-якому бажаному рівні точності та спектрі кольорів. Компактність цих пристроїв створює умови для монтажу в будь-яких важкодоступних або малогабаритних просторах. У поєднанні з комп'ютерними технологіями це відкриває нові можливості в галузі проектування та розробки сільськогосподарської техніки [15].

Технологія фотосепарації потоку продукту полягає у визначенні сторонніх предметів або самих продуктів, що відрізняються за кольором, відтінком, ступенем прозорості та розмірними параметрами. Основними є фотосепаратори: на сенсорах; з CCD-камерами (або CMOS-камерами); з інфрачервоними камерами. Монохроматичне сепарування полягає у розрізненні відтінку кольору одного продукту від відтінку іншого. Кольорове сепарування застосовують за двома і більше кольорами (біхроматичні, трихроматичні, RGB – red-green-blue системи та їхні варіації). Рідше використовують сепарації в ІЧ-спектрі (у тому числі однакових за кольором частинок), рентгенівське та УФ-люмінесцентне сортування (засноване на ефекті свічення домішок у продукті при опроміненні цими довжинами хвиль) тощо [16].

Основний робочий елемент CCD-камери – кремнієва матриця зі світлочутливих елементів. Зображення з CCD-матриць виходить точковим. Спеціальні системи аналізують інтенсивність потоку в різних спектрах, підсумовують їх і перетворюють на кольорове зображення.

У фотосепараторах застосовують два способи подачі матеріалу – з вільним падінням матеріалів по каналах у лотках під дією власної ваги та переміщенням по стрічках транспортерів у бік оптики для детекції.

Стандартний процес сортування полягає в наступному [17]:

- із завантажувального бункера за допомогою вібрації матеріал подається по жорсткому жолобу в розподільні канали;
- по каналах продукт потрапляє в освітлену зону об'ягу за допомогою датчиків або CCD-камер, які генерують електричний сигнал для комп'ютерної системи керування.
- залежно від типу сигналів комп'ютерна система контролю подає команду на відкриття ежектора, який видуває зерна, що відрізняються за кольором або бур'янисті домішки.

Спосіб переміщення продукції по стрічках транспортерів застосовують для переробки та сортування фруктів, овочів і коренеплодів [18]. Слід зазначити, що в багатьох апаратах передбачено вторинне сортування, яке дозволяє ретельніше сортувати зерновий матеріал, мінімізуючи відсоток втрат придатного продукту.

При цьому фотосепарація є лише однією з операцій повного циклу обробки. Такі лінії розраховані на продуктивність до 20–25 тонн на годину і більше.

Характерною рисою виробників фотосепараторів є розробка так званої загальної платформи. Пропонується основне рішення, що поєднує конструктивний принцип сортування та спосіб подачі матеріалу з можливістю варіювання використовуваних фотоустановок.

У фотосепараторах PIXEL (SEA, Італія) системи CCD-камер комплектуються набором змінних світлофільтрів для продуктів зі слабким контрастом, а також програмуються відповідно до розмірів дефектних ділянок, що видаляються з поверхні продукту.

Загальною тенденцією є прагнення до утилітарності розроблюваних сепараторів та розширення спектру їхнього застосування для продуктів, що відрізняються за масою, формою та структурою.

Сортувальна система ZEA здійснює сортування за розміром і відбраковує обгортку, продукцію з дефектами та ураженнями, а також сторонні домішки. При цьому використовується принцип сенсорної селекції.

Для сортування пропонуються чотири варіанти конфігурації:

- з відеокамерою, яка знімає зверху два або три потоки продукції, що сортується;
- з відеокамерами, які знімають зверху та знизу два або три потоки продукції, що сортується.

У разі зйомки лише зверху недоліком була одностороння зйомка, під час якої нижня частина качанів була недоступна для огляду. Тому кращими є варіанти зі зйомкою як зверху, так і знизу.

Слід зазначити, що технічне рішення для системи ZEA TOMRA Sorting базується на загальній платформі розробок компанії. Контроль здійснюється сенсорною системою, коли качани кукурудзи перебувають «у польоті». Робоча швидкість подачі качанів суцільним потоком 5 м/с, посилена дією наддуву до 5 атм, негативно впливає на їхній стан.

Судячи з кадрів процесу сортування, качани зазнають явно виражених ударних навантажень, внаслідок чого є вибирання зерен і навіть часткове пошкодження самих качанів.

Продуктивність систем ZEA марок 32, 48 і 64 становить 1500, 2250 і 3000 шт./кв при вхідному тиску повітря 2,5, 3,75 і 5 атмосфер.

Отже, системи ZEA TOMRA Sorting не цілком придатні для дбайливої обробки качанів повної стиглості та переробки партій вагою в кілька сотень кілограмів, а також не розраховані на поштучну орієнтовану подачу качанів.

Аналіз методів і пристроїв відповідно до наведеної класифікації дозволить зробити такі висновки.

Підвищені вимоги до результату розділення насінневих качанів унеможливили застосування сортувальних машин, які серійно використовуються для інших видів сільськогосподарської продукції, що базуються

як на принципі пневмосепарації суцільного зернового потоку, так і на габаритних розмірах (як, наприклад, для картоплі) [19].

Принцип поділу ґрунтується на відмінностях у основних структурних зонах качана – обертово-повітряному та зерновому шарі. Унаслідок цього виключається можливість сортування за масою та розміром.

Було обрано два основні напрямки для розробки сепараторів з використанням відмінностей у параметрах – прилипання оболонки і зернятка до різних поверхонь та з використанням світловідбивних властивостей листя оболонки й поверхні зернятка. Сучасний рівень технічної досконалості різних електронних пристроїв однозначно визначив найперспективніший напрямок для розробки сепарційних пристроїв – використання світловідбивних властивостей різних частин рослинних об'єктів.

1.3 Огляд теоретичних досліджень

У пристроях для переробки кукурудзяних качанів використовують похилі площини, а також транспортери (серійні та оригінальні) як елементи конструктивних рішень. За результатами теоретичних досліджень обґрунтовують розмірні та динамічні параметри, обирають характеристики їхніх поверхонь [20].

У роботі [21] для сортування рослинних об'єктів пропонувалося використовувати керовану рухому похилу площину з поздовжньо-вертикальним рухом полотна. Було розглянуто три випадки руху частинок по рухомій похилій гірці при коефіцієнті тертя, більшому, рівному та меншому за тангенс кута нахилу площини. У результаті було визначено шлях і час руху частинок для цих випадків.

Шлях, пройдений частинкою, визначається за формулою (1.1)

$$S_r = \frac{v \cos \varphi}{2 \cdot g \sin(\alpha - \varphi)} \cdot v_0 + v_t, \quad (1.1)$$

де S_r – шлях, пройдений по полотну, м;

v – відносна швидкість, м/с;

φ – кут тертя, град;

α – кут нахилу площини, град;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

v_0 – абсолютна швидкість, м/с;

v_t – швидкість перенесення, м/с.

Час руху частинки, коли швидкість дорівнює нулю, дорівнює:

$$t = \frac{v_0 \cos \alpha}{g \cdot \sin(\alpha - \varphi)} \quad (1.2)$$

Особливе місце серед досліджень, присвячених очищенню качанів, посіла робота [48], в якій у практиці сортування та очищення кукурудзи застосовано розрідження. Захоплення обгортки аеродинамічним полем всмоктувального отвору та подальший відрив було визначено за умовою:

$$P_{\text{пер}} = k_2 \rho b_1 \frac{0,66 (d_k^2 - y)}{y} \cdot \frac{c_0^2}{\left(1 + k_1 \left(\frac{y}{\sqrt{F_n}}\right)^{1,4}\right)^2} \quad (1.3)$$

де k_2 – коефіцієнт пропорційності опору обмотки;

ρ – густина повітря, кг/м³;

b_1 – ширина листа, м;

d_k – діаметр отвору присоски, м;

y – відстань від присоски до качана, м;

k_1 – коефіцієнт, що характеризує тип отвору присоски;

F_n – площа калібру, м².

За результатами експериментальних досліджень, повнота виділення повністю неочищених качанів із купи становила 95 – 99 %.

Теоретичні рішення, пов'язані з розрахунковими параметрами фотосепараторів, повністю ґрунтуються на програмних продуктах та роздільній здатності скануючих камер. Роздільна здатність CCD-камер становить 1024 або

2048 пікселів. Застосування інфрачервоних камер дозволяє відокремлювати матеріали, однакові за кольором, але різні за структурою. Наприклад, насіння дикої редьки («коробочки») у світлій гречці. Розмір дефектів, які можуть виявляти сенсори, CCD та інфрачервоні камери, становить 0,17–0,2 мм.

Для визначення відмінностей у кольоровій гамі найпоширенішим є метод RGB заснований на принципі точкового зображення з найменшою одиницею в піксель. Колір кожного пікселя стримують у результаті змішування трьох основних кольорів – червоного, зеленого та синього, які відрізняються діапазонами довжин хвиль (625-740, 500–565 і 440-485 нм) та частот (405-480, 530-600 і 620-680 ТГц). RGB – це адитивна колірна модель, яка, як правило, описує спосіб подання кольору для відтворення кольорів.

Отримуючи відбите світло від матеріалу, що сортується, скануючий пристрій генерує електричний сигнал для комп'ютерної системи управління. Провідні розробники фотосепараторів створюють власні програмні продукти, які є інтелектуальною власністю.

1.4 Мета та завдання дослідження

Для виробництва насіннєвого матеріалу з продовольчою метою та на силос питання технічного оснащення згодом вирішується успішно завдяки комбайновій технології збирання, оскільки операції попереднього очищення качанів та їх перебирання виключаються. У процесі післязбиральної переробки качанів насіннєвої кукурудзи на першому етапі селекції та первинному насінництві ці операції є одними з основних.

Недосконалість технічних та електронно-контрольних пристроїв, широкий діапазон показників біометричних і фізико-механічних властивостей різних частин качанів кукурудзи не давали можливості конструювати компактні, надійні, прості в експлуатації та розраховані на порівняно невеликі обсяги насінні сортувальні машини. Теоретичні розробки мали вузько спрямований характер з тих же причин.

Проблемність ситуації полягає в наступному: з одного боку існують експериментальні лінії для сортування качанів із високою продуктивністю, які не

пристосовані до переробки партій невеликих обсягів, а з іншого — підвищення продуктивності праці під час ручного перебірання можливе лише екстенсивним шляхом.

З огляду на вищевикладене, як робочу гіпотезу висуваємо припущення, що підвищення продуктивності та зниження витрат ручної праці під час сортування качанів насінневої кукурудзи можна досягти завдяки застосуванню установки зі змінною кривизною робочої поверхні. Тому дана робота спрямована на вирішення питання сортування качанів, що виключає ручну працю та враховує біометричні й фізико-механічні властивості оболонки і зерні при застосуванні робочої поверхні зі змінною кривизною, а також кодів забарвлення поверхонь оболонки і зерні.

Метою даної роботи є підвищення продуктивності та зменшення витрат ручної праці під час сортування купи качанів насінневої кукурудзи шляхом оптимізації режимів роботи установки зі змінною кривизною робочої поверхні.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- на основі аналізу існуючих на сьогодні технологій та засобів механізації для сепарації качанів кукурудзи, а також особливостей їх біометричних та фізико-механічних властивостей, розробити конструктивно технологічну схему установки для сортування їх на очищені та неочищені;
- теоретично обґрунтувати, дослідити та оптимізувати процес взаємодії початків кукурудзи з робочою поверхнею змінної кривизни сортувальної установки;
- дослідити біометричні та фізико-механічні властивості качанів кукурудзи;
- розробити методику розпізнавання очищених і неочищених качанів за кольоровими кодами;
- експериментально дослідити процес сортування качанів на установці з робочою поверхнею змінної кривизни та кодовим розпізнаванням залежно від ступеня очищення;
- провести польові дослідження установки для сортування качанів, розробити методику інженерного розрахунку основних конструктивних параметрів та оцінити її економічну ефективність.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

2.1 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми установки для сортування качанів кукурудзи

Відповідність вихідним вимогам до пристроїв для сортування качанів можлива за умови контролю процесу та більш точного використання біометричних і фізико-механічних властивостей самих качанів. Відповідно до поставленого завдання було розроблено установку для розділення качанів насіннєвої кукурудзи на очищені та неочищені з використанням відмінностей за шорсткістю та за кольоровими кодами зерняток і оболонок, схема якої наведена на рисунку 2.1 [22].

Установка працює наступним чином. Качани домінують вибираються з бункера і підіймаються ковшом транспортера-дозатора. У верхній точці вони скочуються по зворотній стороні ковша і потрапляють на похилу площину. У нижній частині вони змінюють напрямок руху і надходять на висхідну похилу площину, на якій їхня швидкість знижується. У верхній частині висхідної площини, освітлені та зафіксовані відеокамерою качани розпізнаються блоком управління. Виконавчий механізм направляє очищені качани на напрямну для очищених качанів і в їхній бункер. Неочищені, зафіксовані відеокамерою та розпізнамі блоком, пропускаються виконавчим механізмом у свій бункер. Для поліпшення процесу розділення качанів нахил поверхні регулюється.

Рисунок 2.1 – Схема установки для розділення качанів: 1 – бункер; 2 – транспортер-дозатор; 3 – ковш; 4 – похила поверхня ковша; 5 – похила поверхня; 6

– радіальна крива поверхня; 7 – висхідна поверхня; 8 – освітлювальний блок з відеокамерою; 9 – блок управління; 10 – виконавчий механізм; 11 – напрямна для очищених качанів; 12 – бункер для очищених качанів; 13 – бункер для неочищених качанів; 14 – механізм регулювання кута нахилу висхідної поверхні.

Теоретичне вирішення питання про процес переміщення початків по робочих поверхнях розділювача з аналізом отриманих закономірностей та їх графічною інтерпретацією було виконано в такій послідовності:

- визначено динамічні та лінійні параметри, за яких відбувається безпечне перевантаження качанів з ковша транспортера-дозатора на похилу площину;
- досліджено умови перекочування качанів по похилій поверхні; визначено динамічні та лінійні параметри, за яких відбувається кочення без ковзання по похилій поверхні розділювача;
- визначено динамічні та лінійні параметри, за яких відбувається кочення без ковзання по похилій поверхні розділювача.

2.2 Визначення безпечних умов переміщення качанів на робочу поверхню

Безпечне перевантаження качанів з ковша транспортера-дозатора на похилу площину можливе за умови відсутності ударних навантажень.

Розглянемо ситуацію, коли під час руху качанів по похилій поверхні під час дотику відбувається косий удар об поверхню напрямної, і качани пролітають певну відстань. Потім відбувається другий дотик. Якщо коефіцієнти відновлення не перевищують значень, при яких качани відриваються від напрямної, то відбувається їх переміщення по похилій поверхні.

З теорії удару відомо, що модуль відбиття при першому дотику можна виразити так:

$$U = v \cdot \sqrt{\sin^2 \alpha + k^2 \cos^2 \alpha} \quad (2.1)$$

де U – швидкість відбитого качана, м/с;

v – швидкість удару качана в момент долику, м/с;

α – кут падіння, град;

k – коефіцієнт відновлення.

Траєкторія руху качана

$$z = \frac{k}{tg\alpha} \cdot x - \frac{g x^2}{2v^2 \sin^2 \alpha (tg^2 \alpha + k^2)} \quad (2.2)$$

Аналіз закону руху качана наведено на графіку 2.2

1 – $U = 0,1$ м/с; 2 – $U = 0,3$ м/с; 3 – $U = 0,5$ м/с

Рисунок 2.2 – Траєкторії польоту качана, відбитого від поверхні, при швидкості зіткнення v , $\alpha = 60^\circ$, $k = 0,15$

В результаті аналізу виразу (2.2) та його графічної інтерпретації (рисунок 2.2) встановлено, що при швидкостях зіткнення з поверхнею 0,1; 0,3 та 0,5 м/с качан піднімається над площиною зіткнення на 13 мм. Таким чином, він відривається від поверхні на дуже малу висоту, тому зіткнення з поверхнею можна надалі не враховувати.

Рисунок 2.3 – Дальність польоту качана після першого зіткнення з поверхнею при різних кутах падіння α

Дальність польоту качана після першого дотику склала:

$$x_{max} = \frac{v^2}{g} \cdot k \cdot \sin 2\alpha (tg^4 \alpha + k^2) \quad (2.3)$$

З рівняння (2.3) випливає, що дальність переміщення при першому дотику початка до напрямної залежить від швидкості в момент дотику, кута падіння та коефіцієнта відновлення.

Криві, представлені на рисунку 2.3, дають уявлення про дальність переміщення качана вздовж поверхні без дотику до неї. В результаті аналізу кривих графіка, побудованого з використанням закономірності, встановлено, що дальність польоту качана після зіткнення з поверхнею похилої площини залежно від швидкості має значення від 0,02 м при швидкості 0,9 м/с і куті падіння 60° до 0,0025 м при куті 30° . Таким чином, можна вважати, що ці значення практично не впливають на процес розділення качанів і ними можна знехтувати при розробці апарату для розділення на очищені та неочищені качани.

Рисунок 2.4 – Схема сил, що діють на качан під час кочення по похилій поверхні

У разі кочення качана по поверхні без зіловача отримуємо динаміку його руху:

$$m \frac{dv}{dt} = m \cdot g \cdot \sin \Theta - m \cdot g \cdot \cos \Theta \cdot \operatorname{tg} \varphi - n \cdot g \cdot \cos \Theta \cdot \frac{f_k}{r} \quad (2.4)$$

де m – маса качана, кг;

Θ – кут нахилу напрямної, град;

t – час кочення качана по напрямній, с;

φ – кут тертя ковзання, град;

f_k – коефіцієнт тертя кочення, м;

r – радіус качана, м.

Розклавши змінні та проінтегрувавши рівняння (2.4) у початковий момент часу при $t = 0$, отримали

$$v_n = g \cdot t \cdot \cos \Theta \cdot \left(\operatorname{tg} \Theta - \operatorname{tg} \varphi - \frac{f_k}{r} \right) + v \cdot \sqrt{\sin^2 \Theta + k^2 \cdot \cos^2 \Theta} \quad (2.5)$$

Аналіз рівняння 2.5 та графіка (рисунок 2.5) дає підстави зробити висновок, що використання похилої площини для розділення качанів можливе за умови зміни шорсткості поверхні, при цьому різниця у швидкості перекочування початків очищених і неочищених по поверхнях з різною шорсткістю матиме значні відмінності коефіцієнтів тертя кочення між початками. Качани, що перекочуються

під кутом нахилу 30° по сталевій поверхні (крива 1) і штучного волокна (крива 4), відрізняються швидкостями гальмування кочення на величину $1,4 \text{ м/с}$

$$1 - f_k = 0,003 \text{ м}; 2 - f_k = 0,008 \text{ м}; 3 - f_k = 0,0012 \text{ м}; 4 - f_k = 0,015 \text{ м}$$

Рисунок 2.5 – Швидкість кочення качана по похилій поверхні залежно від нахилу для коефіцієнтів тертя кочення f .

Аналіз виразу (2.5) та його графічного зображення дає підстави зробити висновок, що зі збільшенням шорсткості поверхні швидкість початка зменшується, і чим більша шорсткість, тим сильніше гальмування початка (рисунок 2.6).

Рисунок 2.6 – Швидкість кочення качана по похилій поверхні залежно від шорсткості поверхні

При шорсткості поверхні з коефіцієнтом тертя більше 0,65 шлях, пройдений качаном, переходить у від'ємні значення. Це свідчить про те, що збільшення шорсткості поверхні призводить до інтенсивного гальмування качана під час руху по похилій площині. Використовуючи отримані дані аналізу виразу (2.5), можна проєктувати апарат зі змінною шорсткістю поверхні для розділення качанів на очищені та неочищені. Шлях, який проходить качан, можна визначити за допомогою виразу:

$$\frac{dL}{dt} = g \cdot t \cdot \cos \theta \cdot \left(\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg} \varphi - \frac{f_k}{r} \right) + v \cdot \sqrt{\sin^2 \theta + k^2 \cdot \cos^2 \theta} \quad (2.6)$$

де L – довжина напрямленої, м.

Розклавши змінні та проінтегрувавши рівняння (2.6) за умови $t = 0$, отримали:

$$L = \frac{g \cdot t \cdot \cos \theta}{2} \cdot \left(\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg} \varphi - \frac{f_k}{r} \right) + v \cdot t \cdot \sqrt{\sin^2 \theta + k^2 \cdot \cos^2 \theta} \quad (2.7)$$

Рівняння (2.6) можна перетворити, виразивши в ньому t через $v_{кр}$, k , φ та f_k :

$$L = \frac{v_{кр}^2 - (\sin^2 \theta + k^2 \cdot \cos^2 \theta)}{2 \cdot g \cdot \cos \theta \operatorname{tg} \theta - \left(\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg} \varphi - \frac{f_k}{r} \right)} \quad (2.8)$$

Аналіз отриманих залежностей (2.2-2.8) дає можливість зробити висновок, що використання похилої площини для відокремлення очищених від неочищених качанів кукурудзи можливе за умови зміни її шорсткості.

Рисунок 2.7 – Відстань перекочування качана при куті нахилу направляючої θ , $\varphi = 230^\circ$, $f = 0,008$ м, $v = 0,3$ м/с, $r = 0,02$ м залежно від часу.

З цією метою можна використовувати в якості похилої площини поверхні, виготовлені з гладкого сталевого листа, гуми, шари та інших матеріалів.

Рисунок 2.8 – Відстань перекочування качана при $\varphi = 230$, $f = 0,003$ м, $r = 0,015$ м, $v = 0,3$ м/с залежно від кута нахилу поверхні.

Рисунок 2.9 – Відстань перекочування качана при $\theta = 450^\circ$, $f = 0,003$ м, $r = 0,015$ м, $v = 0,3$ м/с залежно від φ

Під час кочення качана по похилій площині на нього діють такі сили: сила тяжіння mg , нормальна реакція N площини, лінія дії якої проходить через центр ваги качана C , та сила тертя $F_{\text{тер}}$, спрямована вгору по похилій площині.

Прискорення центру ваги качана дорівнюватиме:

$$\omega = \frac{dv}{dt} = r \frac{d\omega}{dt} = \frac{2}{3} g \sin \theta \quad (2.9)$$

З аналізу виразу (2.9) та графіка (рисунок 2.9) випливає, що зі збільшенням кута нахилу та наближенням прискорення до критичного значення приріст швидкості зменшується.

Рисунок 2.10 – Прискорення центру ваги качана залежно від кута нахилу площини θ

Рівняння дозволяє визначити умову кочення качана по похилій поверхні без ковзання:

$$f \geq \frac{1}{3} \tan \theta \quad (2.10)$$

2.3 Кочення качана по поверхні зі змінною кривизною

Покращити сортування качанів кукурудзи на очищені та неочищені можна з урахуванням їх фізико-механічних властивостей за допомогою гірок зі змінною кривизною.

Розглянемо гірку зі змінною кривизною поверхні (рисунок 2.11), яка включає ділянку розгону та ділянку гальмування при виході качана з елеватора. Рух качана по такій поверхні можна представити як плоскопаралельний (рисунок 2.12 а, б).

Рисунок 2.11 – Схема гірки зі змінною кривизною поверхні: 1 – низхідна поверхня, 2 – перехідна ділянка, 3 – висхідна площина, 4 – механізм регулювання нахилу площини, 5 – качан

Склали диференціальні рівняння руху початкового елемента по похилій площині відповідно до рисунка 2.12 а.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = mg \sin \alpha - F \quad (2.11)$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = mg \cos \alpha - N \quad (2.12)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = Fr \quad (2.13)$$

Рисунок 2.12 – Розподіл сил під час обертання качана кукурудзи: а – похила поверхня; б – висхідна поверхня; m – маса качана, кг; P – сила тяжіння качана, Н; r – радіус качана, м, F – сила тертя, Н; v_c – швидкість кочення качана, м/с, α – кут

нахилу похилій поверхні, град; β – кут нахилу зростаючої поверхні, град; x – вісь координат, паралельна площині спадання; y – вісь координат, перпендикулярна площині спаду; z – вісь координат, перпендикулярна площині XoY ; x_1 – вісь координат, паралельна площині підйому; y_1 – вісь координат, перпендикулярна площині зростання; z_1 – вісь координат, перпендикулярна до поверхні x_1Oy_1 ; β – кут нахилу зростаючої поверхні, град; C – центр ваги качана

Розв'язавши рівняння, визначили швидкість вершини на кінці низхідної поверхні

$$v_c = v_0 + gt \sin \alpha \quad (2.14)$$

де v_0 – початкова швидкість качана, м/с.

Швидкість кочення качана по похилій площині, що спускається вниз, має лінійну залежність, що підтверджується графіком 2.12 в інтервалі часу від 0 до 0,5с.

Відстань, яку пройде качан, дорівнює

$$s = v_0 t + \frac{gt^2}{2} \sin \alpha \quad (2.15)$$

Рисунок 2.13 – Швидкість качана на похилій поверхні залежно від часу руху

Рисунок 2.14 – Відстань, пройдена від початку руху залежно від часу руху при різних кутах нахилу поверхні

Момент інерції качана становить:

$$J_c = \frac{mr^2}{2} \quad (2.16)$$

Шлях, який проходить кулька після дотику до поверхні похилої площини, що спускається, залежить від початкової швидкості та часу її руху (рисунок 2.13).

Тоді кінетична енергія качана, що котиться вниз по похилій поверхні, дорівнює:

$$T = \frac{1}{2}(mv^2 + J\omega^2) = \frac{1}{2}m\left(v^2 + \frac{1}{2}r^2\omega^2\right) = \frac{3}{4}mv^2 \quad (2.17)$$

Диференціальні рівняння руху початкового елемента по висхідній площині, відповідно до рисунка 2.11б мають вигляд:

$$m \frac{d^2x_1}{dt^2} = -mg \sin \beta \quad (2.18)$$

$$m \frac{d^2 y_1}{dt^2} = -ng \cos \beta \quad (2.19)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = -N_1 f_k \quad (2.20)$$

Розв'язавши рівняння (2.13) і (2.19), визначили швидкість качана v_c на висхідній поверхні (рисунок 2.14)

$$v_c = v_0 - gt \sin \beta \quad (2.21)$$

Розв'язавши рівняння (2.21) відносно t , визначили час перекочування до повної зупинки качана на висхідній поверхні

$$t = \frac{v_0}{g \sin \beta} \quad (2.22)$$

Відстань, яку пройде початок до повної зупинки, становитиме (рисунок 2.15)

$$x_1 = v_0 t_1 - \frac{gt^2}{2} \sin \beta \quad (2.23)$$

Рисунок 2.15 – Швидкість качана на висхідній поверхні залежно від кута нахилу поверхні

Рисунок 2.16 – Час до повної зупинки качана залежно від часу

Розв'язавши рівняння (2.21), отримали значення кутової швидкості початку підйому по висхідній поверхні:

$$\omega_n = \omega_0 - \frac{g r I I}{r^2} \sin \beta \quad (2.24)$$

Рисунок 2.17 – Кутова швидкість качана на висхідній поверхні залежно від кута нахилу

Позначив кінетична енергія качана дорівнюватиме роботі всіх сил:

$$T - T_0 = \sum A_i^e \quad (2.25)$$

Кінетична енергія качана, що котиться по похилій поверхні, при повній зупинці дорівнюватиме нулю. Тоді шлях можна визначити за рівнянням (2.25).

$$0 - \frac{3}{4}mv_c^2 = -mgs \sin \beta - N_1 f_k \frac{s}{r} = -m \left(\sin \beta + \frac{f_k}{r} \cos \beta \right) s \quad (2.26)$$

Розв'язуючи рівняння (2.26) щодо s , знайшли траєкторію, яка пройде від початку до повної зупинки:

$$s_n = \frac{3v_c^2}{4g \left(\sin \beta + \frac{f_k}{r} \cos \beta \right)} \quad (2.27)$$

Для аналізу виразу (2.27) з урахуванням фізико-механічних властивостей, визначених у результаті проведених експериментів, побудувати графіки (рисунок 2.18) для різних значень коефіцієнтів тертя ковзання f_k та кутів нахилу висхідної поверхні β .

У результаті досліджень, проведених методом графічної інтерпретації (рисунок 2.18), було встановлено, що зміна шорсткості поверхні призводить до зміни коефіцієнтів тертя ковзання.

Це, у свою чергу, призводить до зміни шляху, який проходить качан по висхідній поверхні. Збільшення кута нахилу поверхні призводить до зменшення шляху руху початка по висхідній поверхні.

Розглянули залежність дальності переміщення початка від кута нахилу β висхідної поверхні (рисунок 2.18).

Рисунок 2.18 – Відстань перекочування качана залежно від коефіцієнта тертя кочення f_k та кута нахилу β висхідної поверхні

Характер графіків наочно показує, що зі збільшенням кута підйому різниця в шляху при зміні коефіцієнта тертя кочення є незначною. Менші значення кутів підйому дають більшу різницю в шляху проходження початка до зупинки.

2.4 Вибір коду забарвлення для сортування качанів у обгортках та без обгортки

Для контролю ступеня очищення качанів кукурудзи від обгорткових листків було обрано RGB-метод колірності розділення [23]. Це дозволило застосувати для досліджень побутові фото- та кінокамери марки Canon із роздільною здатністю 1920×1080 та частотою 50 кадрів на секунду. Для створення каталогу видів, що підлягають розпізнаванню за кольорами було зроблено фотографії початків (об'єктів) (рисунок 2.19). Об'єкту присвоєрався шифр, а фотографія розміщувалася в папці основного тома комп'ютера. Потім створювалися матриці компонентів за кольорами відповідної фотографії.

Рисунок 2.19 – Початкова фотографія качана в обгортках

З урахуванням різної відбивної здатності листя оболонки та зернового шару, а також відмінностей у довжинах хвиль трьох основних кольорів визначали, за допомогою якого з цих кольорів можна отримати ефект сепарації.

2.5 Розрахунок параметрів місця розташування оптичного датчика

Для визначення місця розташування датчика контролю ступеня очищення качанів використовували їх розмірні характеристики. Процес сортування качанів на установці здійснюється під час їх орієнтованого перекочування відносно поздовжньої осі по похилій площині зі змінною кривизною. Схема похилої площини для визначення місця розташування датчика розділовача качанів представлена на рисунку 2.20.

Рисунок 2.20 – Схема визначення точки для встановлення датчика: A і B – початок і кінець висхідної площини, l – довжина висхідної площини, x – місце для встановлення датчика, r_1 – центр розрахункової дуги для встановлення датчика, y – місце встановлення датчика, α – кут контролю датчика, h – висота розташування датчика

Для визначення точки розташування датчика за початок відріку брали кінцеву точку висхідної площини B . Тоді x – це ділянка, на якій блок керування визначає ступінь очищення качанів кукурудзи.

Ділянка похилої площини, над якою має розташовуватися датчик, має довжину, що дорівнює довжині кола качана:

$$x = \pi d_n, \quad (2.28)$$

де d_n – діаметр качана кукурудзи.

Тоді висота розташування датчика дорівнюватиме висоті трикутника, основа якого дорівнює довжині кола качана:

$$h = \frac{x}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = \frac{x \cdot \sin \alpha}{2 (1 - \cos \alpha)} \quad (2.29)$$

Розташування датчика відносно точки В становитиме величину, рівну половині довжини кола качана:

$$x_l = \frac{x}{2} = \frac{\pi d_n}{2} \quad (2.30)$$

Очевидно, що в якості розрахункових слід обирати максимальні значення діаметрів качанів кукурудзи, отримані в результаті обробки біометричних параметрів різних гібридів.

Висновки до розділу:

– встановлено закон руху качана кукурудзи після зіткнення з поверхнею похилої площини. В результаті аналізу отриманих закономірностей руху встановлено, що безпечне перевантаження качана з ковча транспортера-дозатора на похилу площину установки відбувається при швидкостях входу качанів на неї від 0,3 до 0,4 м/с. При цьому швидкісному режимі висота підйому колосків над площиною становить 0,0042 – 0,0055 м, а дальність перельоту відповідно 0,004 – 0,0078 м, що не впливає на їхнє подальше переміщення;

- встановлено, що коефіцієнти тертя качення впливають на перекочування качана, якщо їхні значення значно відрізняються для очищених і неочищених качанів. Такими поверхнями можуть бути шпунт, волокна та шкіра;
- для визначення конструктивних і динамічних параметрів, а також розрахунку енергетичних витрат перекочування качанів по площині змінної кривизни отримано теоретичні закономірності щодо розрахунку лінійної та кутової швидкостей, величини шляху переміщення та гальмування качача, які описуються рівняннями, в яких враховано фізико-механічні властивості;
- на основі RGB-методу розроблено методуку ідентифікації качанів за кольорними характеристиками зерен та обгортки, застосування якої дозволить розрізняти качани залежно від ступеня покриття їх поверхні обгорткою;
- визначено параметри місця встановлення датчика ідентифікації початків за кольорним і характеристиками зерен та обгортки.

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Для підтвердження теоретичних досліджень було розроблено програму та методику експериментально-лабораторних досліджень, які полягали в наступному:

1. Визначити біометричні та фізико-механічні показники качанів, що безпосередньо пов'язані з умовами сортування.

2. Дослідити процес перекочування качанів на поверхні зі змінною кривизною. Розробити методику визначення кодів забарвлення поверхонь очищених і неочищених качанів, провести дослідження кодів забарвлення качанів і вибрати код, який забезпечує їхнє розмежування.

3. Провести експериментально-лабораторні дослідження роботи установки для сортування качанів на робочій поверхні зі змінною кривизною з використанням кодового розпізнавання за кольором та оцінити її техніко-економічну ефективність.

3.1 Методика визначення біометричних та фізико-механічних властивостей качанів, що впливають на умови їх сортування

Для вивчення біометричних та фізико-механічних властивостей качанів були обрані гібриди кукурудзи ДБ Хотин, ДН Астарта та Піонер П9027, що вирощуються в господарствах України.

Ось основні характеристики обраних нами гібридів кукурудзи, адаптовані під актуальні українські реалії та умови вирощування (зокрема для лісостепової зони):

ДБ Хотин – середньоранній (група ФАО 280) простий модифікований гібрид. Качан циліндричний, довжиною 18-20 см, зерно жовте зубоподібне, число рядів зерен 16-18, маса 1000 зерен 280-300 г, вихід зерна при обмолоті 80–82%, урожайність близько 110-120 ц/га.

ДН Астарта – середньостиглий (група ФАО 360) простий модифікований гібрид. Качан циліндричний, довжиною 21-23 см, зерно жовте зубоподібне, число рядів зерен 16-18, маса 1000 зерен 300-330 г, вихід зерна при обмолоті 81-83%, урожайність близько 130-140 ц/га.

Піонер 19027 – середньоранній (група ФАО 280) простий гібрид. Качан циліндричної форми, довжиною 17-19 см, зерно жовте зубоподібне, число рядів зерен 14-16, маса 1000 зерен 310-340 г, вихід зерна при обмолоті 82-84%, урожайність близько 140-150 ц/га.

Відбір качанів для досліджень проводився відповідно до вимог ДСТУ 4630:2006 та з урахуванням положень галузевих методик випробувань сільськогосподарської техніки на полі розміром 100 на 200 метрів. Кількість відібраних качанів для кожного гібрида становила 100 штук.

Вологість оболонки, зерна та стрижнів відібраних качанів визначалася за загальноприйнятою методикою з використанням швидкодіючого воломіра «Wile-55» з діапазоном вимірювання вологості від 8% до 35%. Точність вимірювань у діапазоні вологості 5-20% становить $\pm 0,5$, а в діапазоні 20-35% дорівнює $\pm 1,0$. Отримані дані автоматично усереднювалися програмою приладу.

Визначення біометричних та фізико-механічних показників проводилося на качанах із кодуванням за гібридами та порядковим номером. Маркування кожного відібраного качана виконувалося шляхом прикріплення бирки розміром 2 * 2 см (рисунок 3.1 а), на якій у чисельнику дробу позначався шифр гібрида, а в знаменнику – порядковий номер качана.

При визначенні точності відліку вимірювань враховувалося, що в метрології похибка відліку при натренованості спостерігача та нормальному окомірі не перевищує 0,2 ціни поділки шкали приладу. Для визначення маси качанів використовували ваги лабораторні квадратні типу ВЛКТ-500 з межею зважування 500 г та точністю вимірювання 1 г.

Об'єм качанів визначали шляхом занурення у мірний циліндр з водою місткістю 2000 мл. Загальна довжина качана визначалася як відстань від верхівки до основи. Довжина опорної поверхні качана визначалася на плиті з оргскла з нанесеною сіткою. Прилад складався зі штатива 1, плити 2 розміром 250 * 350 мм з розміткою у вигляді сітки 10 * 10 мм (рисунок 3.1 б, в, г). Розміри плити обрано за найбільшим діаметром і максимальною довжиною.

Максимальний і мінімальний діаметри качана визначалися за кінцями лінії контакту за допомогою штангенциркуля з точністю 0,1 мм. Моменти інерції вздовж і поперек осі качана визначалися за загальноприйнятою методикою двониткового підвісу, для чого було застосовано універсальний прилад (рисунк 3.2).

Рисунок 3.1 – Прилад для визначення довжини опорної поверхні качана: а – качан у обгортці; б – качан без обгортки; в – загальний вигляд; 1 – підставка; 2 – шпилька з розміткою; 3 – качан

Рисунок 3.2 – Прилад для визначення моментів інерції початків. 1 – підставка; 2 – двонитковий підвіс; 3 – двонитковий підвіс; 4 – одноточковий підвіс; 5 – мірна лінійка; 6 – схил

Для визначення центру ваги прилад (рисунок 3.4) встановлювали строго горизонтально проб нитка схилу проходила через нульову позначку на мірній лінійці, закріплений на поперечній планці. Після чого качан кріпили на одноточковому підвісі. Під дією сили тяжіння качан зупинявся в рівноважному положенні. Після цього виконувався відлік загальної довжини качана та координат центру ваги. Як матеріали тертя поверхонь, за якими визначалися коефіцієнти тертя спокою та руху були обрані: гума, сталь, листя обгортки, поверхня зерноток.

Для дослідження процесу кочення качанів по поверхні зі змінною кривизною та шорсткістю було зроблено лабораторну установку (рисунок 3.3).

Рисунок 3.3 – Схема установки для дослідження перекошування початків по поверхні зі змінною кривизною: 1 – рама, 2 – фіксатор похилої площини, 3 – похила площина, 4 – шарнірний упор, 5 – площина змінного нахилу, 6 – качан, 7 – фіксатор площини змінного нахилу

За допомогою фіксаторів 2 і 7 створювалася можливість зміни кутів нахилу у похилих площин установки. Перекошування початків по похилій поверхні досліджувалося з використанням фотокамери Canon у режимі відеозйомки з частотою 30 кадрів на секунду. Результати всіх вимірювань, спостережень і підрахунків оброблялися методами математичної статистики [24].

3.2 Методика дослідження сортування качанів за кольоровими кодами

Визначення коду забарвлення та відсотка заповнення поверхні качана червоним, зеленим і синім кольорами за методом RGB-кольорового розділення було виконано відповідно до розробленої теорії для програмного забезпечення [25].

Дослідження розподілу качанів за кодами кольорів проводилося на експериментально-лабораторній установці (рисунок 3.4) [26, 27, 28].

Лабораторна установка складалася з корпусу, в якому були встановлені: блок управління, виконавчий механізм, завантажувальне вікно, напрямна для неочищених качанів та напрямна для качанів, очищених від обгортки. Завантажувальне вікно призначене для подачі качанів відповідно до поставленого завдання.

Лабораторна установка працювала таким чином: після ввімкнення перевіряються блок керування та виконавчий механізм. Далі робота проводиться відповідно до методики експерименту.

Рисунок 3.4 – Установка для сортування качанів за кольором: 1 – корпус, 2 – привідний механізм, 3 – напрямна для неочищених качанів, 4 – завантажувальне вікно, 5 – блок керування, 6 – напрямна для очищених качанів

Спочатку проводилися дослідження з розпізнавання очищених і неочищених качанів, а потім — дослідження щодо визначення впливу ступеня очищення на процес сортування за кольоровими кодами.

З метою визначення впливу неповного очищення качанів на процес розділення проводили їх попередню підготовку. Для цього з качанів знімали листя обгортки під різним кутом охоплення (рисунок 3.5).

Рисунок 3.5 – Качани для досліджень за кодами кольоровості

Оцінка впливу ступеня очищення качанів від обгортки на сортування за кольоровими кодами проводилася під час ручної подачі. Для цього використовувалися як повністю очищені качани, так і качани з обгорткою, кут охоплення поверхні якої становив від 50 до 1800 градусів з кроком 50 (рисунок 3.6).

Рисунок 3.6 – Вікно для завантаження качанів: 1 – кріплення, 2 – вимикач, 3 – досліджуваний качан, 4 – завантажувальне вікно, 5 – транспортер із градусною сіткою

Завантаження початків здійснювалося у вікно. Зміна положення початків відносно зчитувального пристрою здійснювалася вручну. Результати проведених досліджень оброблялися за допомогою програми, розробленої для обробки отриманих результатів.

3.3. Методика польових досліджень

Для проведення польових досліджень було розроблено устаткування, яке зображено на рисунку 3.7 [29, 30].

Польова установка забезпечує поштучну збірку качанів із купи бункера-накопичувача. Потім качани підіймаються транспортером-дозатором 2.

Рисунок 3.7 – Польова установка для сортування качанів: 1 – бункер; 2 – транспортер-дозатор; 3 – похила поверхня; 4 – блок управління; 5 – виконавчий механізм; 6 – бункер для очищених качанів; 7 – бункер для неочищених качанів

При зміні напрямку руху у верхній точці елеватора вони скочуються по зворотній стороні ковча і потрапляють на похилу площину 3. У нижній частині вони змінюють напрямок руху і потрапляють на висхідну похилу площину, на якій швидкість качанів знижується. У верхній частині висхідної похилої площини качани, освітлені в блоці та зафіксовані відеокамерою, розпізнаються блоком керування 4. Очищені качани виконавчий механізм 5 направляє на напрямну для очищених качанів і в бункер. Неочищені, зафіксовані відеокамерою та розпізнані блоком управління пропускаються виконавчим механізмом у бункер неочищених качанів.

Під час проведення досліджень у польових умовах до загальної маси качанів, що підлягали розділенню, додавали підготовлені качани. Ступінь покриття їх листям оболонки становив від 10 до 18 градусів. Це створювало умови для виявлення можливостей польової установки щодо якості обробки потоку качанів.

Дані результатів поділу качанів на очищені та неочищені узагальнювали у таблицях для подальшої обробки. За результатами обробки емпіричних даних отримували залежності та будували графіки.

Уточнення основних параметрів розділювача качанів було здійснено методом планування експерименту [31]. В якості математичної моделі розділювача качанів при плануванні експерименту було обрано поліном другого порядку. В якості значущих факторів обрано швидкість кочення качана, кут нахилу робочої площини, кут охоплення качана обгорткою та проведено повний факторний експеримент.

Висновки до розділу:

- Доведено, що сортування качанів на очищені та неочищені можна здійснювати на похилій поверхні, шорсткість якої забезпечуватиме коефіцієнт кочення качанів не менше 0,005 м;
- розроблено методику сортування качанів кукурудзи за відмінностями у кольорі зерен та оболонок, що базується на застосуванні R²B-методу. В якості кодового кольору слід вибирати синій, оскільки його інтенсивність для очищених і неочищених качанів відрізняється в 2,5 рази при середніх показниках 144 і 13 одиниць відповідно.

РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

4.1 Результати дослідження біометричних та фізико-молочічних властивостей качанів, що впливають на умови їх зортування

На момент заготівлі качанів середні показники вологості зерна для різних гібридів коливалися від 22,6 % у «ДБ Хотин» до 26,2 % у ДБ Хотин, а вологість серцевини качанів – відповідно від 32,7 % до 39,8 %, а обгорток – від 18,6 % у ДН Астра до 28,1 % у ДБ Хотин.

В результаті аналізу даних щодо визначення маси досліджуваних гібридів та їх графічної інтерпретації було встановлено, що середні значення маси досліджуваних гібридів коливалися від 216,36 г до 246,08 г. При цьому слід зазначити значні коливання маси серед качанів одного гібрида. Так, коефіцієнт варіації для ДН Астра становив 19,75 %, а мінімальне значення було у Піонер П9027 – 10,17 %. Мінімальне значення маси качана було у ДБ Хотин – 130 г, а максимальне у Піонер П9027 – 410 г. Середні значення маси гібридів ДН Астра і ДБ Хотин незначно відрізняються між собою. Однак розкид значень маси цих гібридів більший, ніж у гібрида Піонер П9027. Гібрид Піонер П9027 має більший щільний розподіл в інтервалі 170 – 270 г.

Середній об'єм качанів також коливався в широкому діапазоні від 256,52 см³ до 298,33 см³. Найменший об'єм було зафіксовано у гібрида «ДБ Хотин» - 114,10 см³, а найбільший – у гібрида «ДН Астра» – 531 см³. Найбільш вирівняним за об'ємом виявився гібрид Піонер П9027, у якого коефіцієнт варіації склав 7,38 %.

При оцінці загальної довжини качана було відзначено, що середні значення для аналізованих гібридів коливалися від 176,3 мм до 196,14 мм. При цьому мінімальні та максимальні розміри у більшості гібридів дуже близькі між собою, що свідчить про достатню вирівняність за цим показником для однакових погодних, ґрунтових та агротехнічних умов вирощування. Найбільш вирівняним серед розглянутих гібридів був Піонер П9027 з коефіцієнтом варіації 4,68 % і найменш вирівняним – ДН Астра з коефіцієнтом варіації 11,69 %.

Окрім загальної довжини качана, для визначення параметрів сортувальної установки важливе значення має опорна довжина качана, яка безпосередньо контактує з робочими органами. Оцінивши довжину опорної поверхні качанів за запропонованою нами методикою, було встановлено, що середнє значення її змінювалося від 111,98 мм для ДН Астра до 123,56 мм у Піонер П9027, при коливаннях від найменших 65 мм до найбільших 169 мм довжин у тих же гібридів. Коефіцієнт варіації для основної частини гібридів знаходився в межах від 12,2 % до 17,43 %, а у Піонер П9027 він склав 7,2 %.

Для розрахунку параметрів сортувальної установки необхідно знати максимальні та мінімальні значення діаметрів опорної поверхні качанів, які можуть визначати як розмірні характеристики робочих органів, так і їхнє взаємне розташування.

Середні значення максимальних діаметрів опорної поверхні коливалися від 48,84 мм у сорту ДН Астра до 54,26 мм у сорту ДБ Хотин, при мінімальному значенні 39,1 мм у сорту ДН Астра і максимальному 63,2 мм у сорту ДБ Хотин. У межах кожного сорту розкид показників незначний – коефіцієнт варіації мав значення 4,17–6,43 %.

Середні значення мінімальних діаметрів опорної поверхні качанів становили від 44,1 мм до 49,1 мм. Мінімальний діаметр опорної поверхні, рівний 41,3 мм, зафіксовано у гібрида ДБ Хотин, максимальний – 56,0 мм у гібрида ДН Астра.

Під час транспортування та переміщення по робочих поверхнях качани відхиляються від прямолінійності руху через нециліндричність форми, тобто конусність опорної поверхні, яку ми оцінювали за кутом нахилу.

Середні значення кутів нахилу опорної поверхні качанів для різних гібридів коливалися від 0,910 у Піонер П9027 до 1,280 у ДН Астра. Коефіцієнт варіації для них становив від 36,46 % до 45,19 % при похибці дослідів у межах 2–4%.

Розташування центру ваги у початкових гібридів, що досліджувалися, оцінювалося за допомогою коефіцієнта

$$k_{ц} = \frac{L_{н}}{L_{к}} \quad (3.1)$$

де L_H – відстань від основи качана до центру ваги, мм;

L_K – відстань від центру ваги до верхівки качана.

В результаті аналізу середніх значень довжини L_H було встановлено, що вони коливалися від 75 мм до 91 мм, а мінімальне значення становило 50 мм при максимальному 125 мм; при цьому слід зазначити достатню рівномірність довжини до центру ваги качана від його основи.

Значення середніх довжин L_K мали значний розкид і коливалися в межах від 88 мм до 109 мм. При цьому мінімальне значення становило 55,1 мм, а максимальне – 162 мм. Загалом, у межах кожного гібрида коливання довжин L_K незначні, про що свідчить коефіцієнт варіації, який мав значення від 6,32 % до 15,05 %.

Середні значення коефіцієнта центру ваги $k_{ц}$ свідчать про те, що для більшості гібридів він зміщений до основи качана. Мінімальне значення середнього показника становило 0,77 у ДН Астра, а максимальне – 1,06 у ДБ Хотин. Мінімальне значення коефіцієнта 0,52 зафіксовано у гібрида ДН Астра, а максимальне – 1,5 у ДБ Хотин. Останній гібрид має найгіршу характеристику за коефіцієнтом варіації, який склав 18,65 %.

В результаті аналізу моментів інерції початків відносно поздовжньої осі було встановлено, що середні значення мають значний розкид – від $1,92 \cdot 10^{-2}$ кг · м² до $5,2 \cdot 10^{-2}$ кг · м². Коефіцієнти варіації мали великий розкид від 18,02 % у Піонер П9027 до 42,64 % у ДБ Хотин. Середні значення моментів інерції відносно поперечної осі початків становили від $1,75 \cdot 10^{-3}$ кг · м до $5,75 \cdot 10^{-3}$ кг · м. Мінімальне значення зафіксовано у гібрида Піонер П9027 – $2,22 \cdot 10^{-3}$ кг · м², а максимальне – у ДН Астра – $3,52 \cdot 10^{-3}$ кг · м², проте вирівняність гібридів ДН Астра, ДБ Хотин, Піонер П9027 має досить великий інтервал, який склав від 23,18 % до 35,90 %.

За результатами теоретичних досліджень встановлено, що робоча поверхня установки повинна мати коефіцієнти тертя, які будуть різними для очищених і неочищених качанів. Тому для дослідження з якості робочих поверхонь було

обрано гуму та сталі. У результаті дослідження коефіцієнтів тертя спокою та руху було встановлено, що для кукурудзи повної стиглості показники незначно відрізняються від літературних даних. Так, середні значення коефіцієнтів тертя спокою качанів в обгортках по сталі склали 0,43 по гумі 0,91. Коефіцієнти тертя руху по сталі становили 0,34, по гумі 0,86. Для коефіцієнта тертя руху та закономірностей його зміни характерні ті самі особливості, що й для коефіцієнтів тертя спокою, але їхні значення на 1,05 – 1,26 рази менші за значення тертя спокою. Значення коефіцієнтів тертя ковзання f_k для початків в обгортках склали: по сталі 0,006 м, по гумі 0,012 м; по шкірі 0,016 м; по текстилю 0,021 м. Для початків без обгортки ці коефіцієнти дорівнювали: по сталі 0,003 м; по гумі 0,009 м; по шкірі 0,008 м; по текстилю 0,014 м.

4.1. Результати дослідження руху качанів кукурудзи по похилій поверхні

Теоретично встановлено, що в початковий момент руху качанка при дотику до похилої поверхні може зазнавати косоного удару і пролітати певну відстань, а потім відбувається другий дотик. Однак, як показав аналіз закономірностей перекочування качанки, після дотику до поверхні величина відбиття від поверхні є досить незначною і практично не впливає на процес руху качанки. У процесі проведення досліджень було встановлено, що зафіксувати процес відбиття під час падіння не вдалося, оскільки швидкості падіння були незначними.

Для дослідження процесу перекочування качанів по похилій поверхні було використано відеозйомку. Перекочування досліджувалося при зміні нахилу низхідної поверхні 30, 45 і 60°, початкових швидкостях дотику 0,316; 0,662; 0,969 м/с і кутах нахилу висхідної поверхні (-5); 0; 5; 10; 15°.

У результаті проведених досліджень було встановлено, що коефіцієнти ковзання качанів для різних поверхонь відрізняються на значні величини — від 0,003 м до 0,021 м.

Результати дослідження залежності швидкості перекочування качанів від коефіцієнтів ковзання качанів в обгортках і без обгортки представлені графічно (рисунок 4.1).

Рисунок 4.1 – Вплив кута нахилу низхідної площини на швидкість перекочування качанів

Аналіз рисунку дає підстави зробити висновок про те, що похила поверхня може бути використана для розділення качанів кукурудзи на очищені та неочищені за умови, що шорсткість забезпечуватиме коефіцієнти ковзання f_k не менше 0,005 м. При цьому переміщення качанів супроводжуватиметься гальмуванням. Зменшення нахилу площини різко гальмує переміщення качанів, які тим швидше зменшать свою швидкість, чим менший нахил.

При швидкостях, що перевищують означену, це призводить до різкого збільшення швидкості ковзання качанів по похилій поверхні (рисунок 4.2, криві 2, 3). Визначення часу ковзання качанів по висхідній похилій поверхні до їх повної зупинки дозволяє обирати геометричні параметри установки для сортування качанів. Для цього досліджували залежність часу гальмування від початкової швидкості перекочування качанів по похилій поверхні (рисунок 4.2). Виконали порівняльний аналіз теоретичних та експериментальних даних зміни часу ковзання неочищених та очищених качанів по похилій поверхні від початкової швидкості.

Рисунок 4.2 – Залежність часу кочення качана до повної зупинки на висхідній похилій площині при початкових швидкостях качана v_n : 1, 2 – $v_n = 0,316$ м/с; 3, 4 – $v_n = 0,662$ м/с; 5, 6 – $v_n = 0,969$ м/с; 1, 3, 5 – теоретичні криві; 2, 4, 6 – експериментальні криві.

У результаті було встановлено, що час гальмування качанок до повної зупинки буде тим меншим, чим більшим є кут нахилу поверхні. Таким чином, із переліку матеріалів, для яких визначено коефіцієнти тертя кочення, найбільш прийнятними є цукіра та штучне волокно при початковій швидкості кочення качанок від 0,3 м/с.

Емпіричні залежності часу зупинки початків на висхідній площині мають вигляд:

при початковій швидкості $v = 0,316$ м/с

$$t_2 = 143,51 \cdot 10^{-3} \cdot \exp \beta_2 + \left(\frac{21,18 \cdot 10^{-3}}{\beta_2} \right) - 349,55 \cdot 10^{-3} \cdot \beta_2 \quad (4.1)$$

при початковій швидкості $v = 0,662$ м/с

$$t_4 = \exp \left(\left(\frac{-5,1299}{\exp \beta_2} \right) - 3,0355 \cdot \ln \beta_2 - \left(\frac{258,13 \cdot 10^{-3}}{\beta_2} \right) \right) \quad (4.2)$$

при початковій швидкості $v = 0,969$ м/с

$$t_6 = \exp \left(\left(\frac{-4,21}{\exp \beta_2} \right) - 2,7028 \cdot \ln \beta_2 - \left(\frac{227,18 \cdot 10^{-3}}{\beta_2} \right) \right) \quad (4.3)$$

В результаті аналізу даних дослідження було встановлено, що при зміні нахилу площини від 0° до 30° як теоретичні, так і експериментальні результати мають ідентичний характер. Різниця між теоретичними та експериментальними значеннями становить 5–7%. Проведений аналіз графіків (рисунки 4.1 – 4.3) переміщення качанів по похилій поверхні залежно від кута нахилу та початкової швидкості перекочування, кута нахилу висхідної поверхні, шорсткості похилої поверхні, стану поверхні качана та розмірних характеристик качанів дає підстави зробити висновок про те, що похила поверхня може бути використана для розділення качанів на очищені та неочищені.

На рисунку 4.3 наведено результати покадрової обробки відеозапису перекочування качанів по поверхні зі штучним матеріалом.

Рисунок 4.3 – Перекочування очищеного качана по похилій поверхні

4.3 Сорткування качанів за кольом кольору

Для визначення коду кольору, який може слугувати основою для програмного забезпечення сорткування качанів, порівняли полігони емпіричного розподілу жовтого, червоного та синього кольорів неочищеного і очищених від обгортки качанів, отримані в результаті експериментально-теоретичних досліджень [32, 33].

Аналіз графіків полігонів, наведених на рисунках 4.5 і 4.6 синього кольору, дав підстави виділити їх для використання під час програмування з метою розмежування неочищених і очищених качанів.

Рисунок 4.4 – Полігон емпіричного розподілу синього кольору неочищеного качана

Рисунок 4.5 – Полігон емпіричного розподілу синього кольору очищеного качана

Так, неочищений качан має ступінь покриття в пікселях $1,3 \cdot 10^4$, а очищений – $3,2 \cdot 10^4$. Таким чином, інтенсивність забарвлення синім кольором очищених качанів перевищує неочищені в 2,5 рази. Значення показників коду щільності для неочищеного качана лежать у діапазоні від 51 до 160, а очищених качанів – у діапазоні колірної гами від 0 до 102. При цьому середні значення коду щільності для неочищених качанів дорівнюють 144, а для очищених – 13, тобто різниця становить 11-кратну величину.

Результати аналізу кодів розподілу червоного кольору наведено на рисунках 4.6 і 4.7.

Рисунок 4.6 – Полігон емпіричного розподілу червоного кольору неочищеного качана

Рисунок 4.7 – Полігон емпіричного розподілу червоного кольору очищеного качана

Різниця в пікселях між неочищеними та очищеними качанами становить $0,3 \cdot 10^4$. У неочищених початків середнє значення щільності коду кольору становить 226, а в очищених – 225. Тому цей колір неаціонально застосовувати, оскільки вони практично не відрізняються один від одного, то червоний код щільності може бути використаний для розділення початків.

Результати аналізу кодів розподілу зеленого кольору наведено на рисунках 4.8 і 4.9.

Рисунок 4.8 – Полігон емпіричного розподілу зеленого кольору неочищеного качана

Рисунок 4.9 – Полігон емпіричного розподілу зеленого кольору очищеного качана

Різниця в пікселях між неочищеними та очищеними качанами становить $0,65 \cdot 10^4$. Середні значення коду щільності кольору для неочищених качанів дорівнюють 205, а для очищених – 151. Тому зелений колір неаціонально використовувати для створення програмного забезпечення, що розрізняє качани на очищені та неочищені.

4.4 Експериментально-лабораторні дослідження сортування качанів

З метою визначення впливу повноти очищення качанів від обгортки на процес розпізнавання за кольоровими кодами під час машинного сортування було проведено дослідження на лабораторній установці (рисунк 3.4). Під час проведення досліджень були підготовлені качани з покриттям у 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16° обгортками зернової частини.

У результаті проведених досліджень було отримано дані, збробка яких із застосуванням методів статистичного аналізу дозволила визначити стандартне відхилення, похибку вибіркового середнього, коефіцієнт варіації, відносну похибку вибіркового середнього у відсотках та провести перевірку за критерієм Кохрена на адекватність.

Емпірична залежність розподілу качанів на очищені та неочищені на лабораторній установці має вигляд

$$W = \frac{1}{\left(\frac{4,8725 \cdot 10^3}{\exp \gamma} + \frac{174,45 \cdot 10^{-3}}{\gamma} \right)} \quad (4.4)$$

де W – відсоток виділених початків на лабораторній установці під час розділення, %;

γ – кут охоплення качана по кризним листками, град.

У результаті проведених лабораторних досліджень встановлено, що качани, які мають покриття листки обгортки на зернової частині з охопленням до 12-15°, частково не виділяються із загальної маси та потрапляють у бункер разом з очищеними. Таке сортування качанів не порушує вихідних вимог до сортування качанів у насінництві.

Таким чином, у результаті лабораторних досліджень було встановлено, що використання в установках для сортування качанів блоків управління з розпізнаванням за кольоровою гамою дає змогу виділяти з потоку неочищені качани з листяним покриттям від 12 до 15° і направляти їх знову на обробку.

Рисунок 4.10 – Залежність виділення неочищених качанів від кута охоплення обгорткою на лабораторній установці

Перевіркою результатів на адекватність досліджуваної моделі з коефіцієнтом довірчої ймовірності, більшим за обране значення 0,95, за критерієм Кохрена було встановлено, що результати є адекватними, оскільки $C_p 0,81 < G_t 0,812$.

4.5 Польові дослідження сортування качанів

Для підтвердження працездатності установки (рисунок 2.4) з розпізнаванням очищених і неочищених качанів кукурудзи за кодами кольоровості під час сортування куча в насінництві було проведено дослідження в господарських умовах. У процесі роботи установки було встановлено вплив неповного очищення качанів на процес сортування. У кучу качанів від комбайна додавали качани, спеціально підготовлені для експерименту.

Визначення сортування качанів на польовій установці проводилося при надходженні качанів на сортування зі швидкістю 0,316 м/с, яка дорівнювала швидкості руху елеватора.

В результаті проведених досліджень були отримані дані, обробка яких з використанням методів статистичного аналізу дозволила визначити стандартне відхилення, похибку вибіркового середнього, коефіцієнт варіації у відсотках,

відносну помилку вибіркового середнього у відсотках та провести перевірку за критерієм Кохрена на адекватність.

За результатами проведених досліджень та аналізу отриманих даних було встановлено, що середнє значення кута охоплення качана обгортковими листами становило $15,5^\circ$, стандартне відхилення – $2,067^\circ$, помилка вибіркового середнього – $0,207^\circ$, коефіцієнт варіації – $13,34\%$. Розпізнавання на польовій установці проводиться з подальшим сортуванням за класами. Результати обробки отриманих даних дали можливість представити їх у вигляді графіку (рисунок 4.12).

Визначено емпіричну залежність густоти виділення качанів із листям обгортки із загальної купи:

$$W = \frac{1}{\left(\frac{4,8725 \cdot 10^3}{e^{\rho \gamma}} + \frac{177,51 \cdot 10^{-3}}{\gamma} \right)} \quad (4.5)$$

Таким чином, розділення зародків відбувається з таким самим результатом, як і на лабораторній установці.

Рисунок 4.11 – Залежність виділення качанів від кута охоплення качана обгорткою на польовій установці

Дещо відрізняється діапазон виділених початків із купи очищених, який становив від 8 до 180. Це більше, ніж на лабораторній установці.

Перевіркою результатів на адекватність досліджуваної моделі з коефіцієнтом довірчої ймовірності, більшим за обране його значення, рівне 0,95, за критерієм

Кохрена було встановлено, що результати є адекватними, оскільки $C_p 0,81 < G_t 0,812$.

4.6 Уточнення основних параметрів установки для сортування качанів методом планування експерименту

Математична модель установки для розділення початків під час планування експерименту описувалася поліномом другого порядку:

$$y = b_0 + \sum^k b_i x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum^k b_{ii} x_i^2 \quad (4.6)$$

Оскільки кількість значущих факторів прийнято порівнювати трьом, було проведено повний факторний експеримент.

Відповідно до прийнятої кількості значущих факторів було складено матрицю центрального композиційного плану другого порядку для розділювача качанів (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1 – Фактори, інтервали та рівні їх варіювання в експериментах з визначення області оптимуму роздільника початків

Рівень та діапазон коливання факторів	Фактор		
	Швидкість кочення качана v , м/с	Кут нахилу площини, β , град	Кут охоплення качана обгорткою α , град
1	0,5	10	15
0	0,3	5	13
-1	0,1	0	11
	0,2	5	2

Після проведення експерименту було виконано розрахунок коефіцієнтів регресії b_0 , b_i , b_{ij} , b_{ii} і їх дисперсій за загальноприйнятою методикою [34].

Значимість відмінності та коефіцієнтів регресії перевіряли за критеріями Стьюдента (t - критерію) та Фішера.

Використовуючи канонічне перетворення для обчислення координат оптимуму, звели рівняння другого порядку до вигляду:

$$y - y_s = B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + \dots + B_{kk}X_k^2 \quad (4.7)$$

де y – значення критерію оптимізації;

y_s – значення критерію оптимізації в оптимальних точках;

X_1, X_2, \dots, X_k – довгі осі координат;

$B_{11}, B_{22}, \dots, B_{kk}$ – коефіцієнти регресії в канонічній формі.

Диференціюючи рівняння (3.7) і обчислюючи похідні, визначали значення критерію оптимізації в оптимальній точці при s та проходили натуралізацію закодованих факторів і дослідження поверхонь відгуку.

Після реалізації матриці планування було визначено коефіцієнти регресії, і рівняння (3.7) набуло такого вигляду:

$$\eta = 79,01 + 2,829 v + 3,075 \beta + 38,5 \gamma - 0,375 v \beta + 0,125 \beta \gamma - 2,09 v^2 - 2,797 \beta^2 - 15,525 \gamma^2 \quad (4.8)$$

Після отримання адекватної математичної моделі другого порядку обчислювали координати оптимуму за формулою (3.8):

$$Y = 105,546 - 2,09 X_1^2 - 2,772 X_2^2 - 15,55 X_3^2, \alpha = 2,526 \quad (4.9)$$

Порівнявши значення коефіцієнтів регресії з абсолютною величиною їхнього довірчого інтервалу, дійшли висновку, що на показники сортування качанів істотний вплив мають як лінійні ефекти, так і їхні взаємодії та квадратури.

Для адекватності представлення результатів експерименту за допомогою полінома другого ступеня було визначено розрахункові значення критерію Фішера

для п'ятивідсоткового рівня значущості. Табличне значення $F_0 = 4,6$ перевищило розрахункове значення $F_p = 0,585$, а тому прийнята модель була адекватною.

Оцінка моделі за t – критерієм показала, що табличне значення перевищує розрахункове t_p , і можна говорити про адекватність досліджуваної моделі з коефіцієнтом довірчої ймовірності, що перевищує обране значення, яке дорівнює 0,95.

Оптимальні параметри технологічного процесу установки для сортування качанів повинні відповідати таким умовам: початкова швидкість кочення качана не повинна перевищувати 0,44 м/с, нахил висхідної поверхні $\beta = 7,54^\circ$, залишкове покриття качана обгортковими листками не повинно перевищувати $\gamma = 10,2\%$.

Таким чином, основними факторами, що впливають на процес розділення очищених і неочищених качанів є нахил висхідної площини та охоплення качана обгортковими листками. Тому ми провели повний аналіз усіх можливих двовимірних перетинів поверхонь відгуків, що характеризують якість розділення качанів. Графічна інтерпретація рівняння (3.7) при постійних значеннях v , β і γ в у різних поєднаннях показано на рисунках 4.12 – 4.14.

Рисунок 4.12 – Поверхня відгуку, що характеризує показник якості розділення качанів при $\gamma = 13^\circ$ та кута повороту осей $\alpha = -13,971^\circ$

Аналіз результатів поверхні відгуку за заданих параметрів показав, що оптимум процесу досягається, коли до 100% початків неочищених, тобто таких, що мають на своїй поверхні покриття у вигляді обгортки на 13° і більше виділяються як неочищені повністю, буде при $v = 0,43$ м/с и $\beta = 7,54^\circ$. Такий

режим роботи установки качанів відповідає вихідним вимогам щодо сортування качанів.

Двовимірний переріз поверхні відгуку, що характеризує поділ початків на очищені та неочищені залежно від початкової швидкості перекочування v та кута обходження початку обгорткою γ (рисунок 4.13), розглядали при $\gamma = 5^\circ$ та кута повороту осей $\alpha = 0,267^\circ$.

Рисунок 4.13 – Поверхня відгуку, що характеризує показник якості розділення качанів при $\gamma = 5^\circ$ та кута повороту осей $\alpha = 0,267^\circ$

В результаті аналізу результатів поверхні відгуку за заданих параметрів було встановлено, що оптимум процесу досягається, коли до 100% качанів, в значенні як неочищені, виділяються з купи, що досягається при швидкості $v = 0,44$ м/с і обгортанні качана обгорткою на $\gamma = 6,1^\circ$.

Двовимірний переріз поверхні відгуку, що характеризує виділення початків із купи зги (рисунок 4.14), розглядали при $v = 0,3$ м/с та кута повороту осей $\alpha = 0,267^\circ$.

Рисунок 4.14 – Поверхня відгуку, що характеризує показник якості розділення качанів при $v = 0,3$ м/с та кута повороту осей $\alpha = 0,267^\circ$

В результаті аналізу поверхні відгуку встановлено, що оптимум досягається, коли 100% качанів неочищених виділяється з купи буде при $\gamma = 15,54^\circ$ та швидкості кочення на висхідній площині $v = 0,335$ м/с. Параметри робочого режиму розділювача початків, коли виділяється до 100% зародки, відповідно до вихідних вимог, повинні відповісти таким оптимальним значенням: початкова швидкість кочення зародків по похилій поверхні не більше $v = 0,44$ м/с, кут нахилу висхідної площини не більше $\beta = 6,1^\circ$, покриття качана обгортковими листками не більше $\gamma = 6^\circ$.

4.7 Визначення положення оптичного датчика

Визначення місця розташування датчика для контролю ступеня очищення качанів здійснювалося з використанням отриманих залежностей (2.15, 2.16) та з урахуванням отриманих значень фізико-механічних властивостей качанів кукурудзи.

Для визначення зони контролю x , точки відліку для визначення горизонтального розташування датчика x_1 та висоти розташування датчика h залежно від діаметра качанів кукурудзи було встановлено такі розміри діаметрів качанів: від 0,01 до 0,08 м. У результаті було отримано лінійні залежності (рисунк 4.15).

Рисунок 4.15 – Графік залежності місця розташування оптичного датчика від діаметра качана кукурудзи: d – діаметр качана кукурудзи, x – довжина ділянки контролю, h – висота розташування датчика, x_1 – відстань до датчика по горизонталі.

За їхніми значеннями можна встановити параметри розташування датчика залежно від діаметрів качанів. При максимальному значенні діаметра качана кукурудзи вони становили: зону контролю 0,229 м, висоту розташування датчика 0,218 м, розташування датчика по горизонталі 0,1245 м. Отриманий графік може бути використаний при виборі конструктивних рішень під час створення пристроїв для контролю якості обробки качанів.

Висновки до розділу:

– у результаті експериментально-лабораторних досліджень установки для сортування качанів кукурудзи отримано емпіричні залежності зв'язання неочищених качанів із купи. Встановлено, що качани з кутами охоплення обгорткою більше ніж 15° всі виділяються як неочищені;

– за допомогою методу планування експерименту було визначено оптимальні параметри процесу сортування качанів за ступенем очищення: швидкість подачі качанів на поверхню плодини перекочування качанів у межах до $v = 0,44$ м/с; кут нахилу висхідної поверхні не повинен перевищувати $\beta = 7,54^{\circ}$; кут охоплення качана обгорткою не більше $\alpha = 10,1^{\circ}$.

РОЗДІЛ 5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

5.1 Охорона праці

Сортування качанів насінневої кукурудзи є одним із ключових технологічних етапів насінництва, що визначає якість посівного матеріалу та врожайність наступного сезону. Незважаючи на значну механізацію галузі, цей процес залишається небезпечним з погляду охорони праці. Поєднання акустичного навантаження, органічного пилу, незручних робочих поз і контакту з рухомими частинами обладнання формує складний профіль виробничих ризиків, що потребує системного аналізу.

Шум є одним із провідних фізичних чинників на сортувальних лініях. Як показують дослідження, рівень звукового тиску на більшості операцій у рослинництві та тваринництві перевищує порогове значення 85 дБ(А) [35]. Сортувальні машини для качанів генерують шум переважно у діапазоні 87-96 дБ(А) залежно від продуктивності лінії та ступеня зношеності обладнання. Тривала робота в таких умовах без засобів захисту органів слуху призводить до шумоіндукованої приглушеності. Така патологія розвивається поступово і часто залишається непоміченою до виникнення стійких порушень. Вібрація ручного сільськогосподарського обладнання в поєднанні з незручними робочими позами є самостійним чинником ризику розладів опорно-рухового апарату у молодих операторів, а профілактичні заходи слід запроваджувати вже на ранніх стадіях трудової діяльності [36].

Органічний пил, що утворюється під час подачі, обертання і калібрування качанів, становить не менш серйозну небезпеку. Зерновий пил є складним аерозолем, що містить фрагменти рослинних тканин, ендотоксини, спори мікроскопічних грибів і алергени. Вдихання таких сумішей провокує запалення дихальних шляхів, хронічний бронхіт і бронхіальну астму, а при тривалому контакті утворюється прогресуюче зниження вентиляційної функції легень. Навіть незначні дози органічного пилу достатні для формування стійких респіраторних симптомів, а ризик зростає пропорційно до тривалості контакту [37]. Особливу небезпеку становлять мікотоксини, зокрема фумонізени і афлатоксини,

концентрації яких у кукурудзяному пилу залежить від умов зберігання качанів і ступеня ураження зерна грибками. Тривалий контакт з афлатоксинами підвищує ризик гепатоцелюлярної карциноми, тому дотримання гранично допустимих концентрацій пилу на робочих місцях є критичним.

Ергономічні ризики при сортуванні качанів зумовлені переважно ручними операціями: відбором нестандартних качанів, їх переміщенням та укладанням у тару. Характерними є тривале стояння, нахили тулуба вперед, локальне м'язове напруження у зоні плечового пояса та попереку. Сільськогосподарські працівники особливо вразливі до виробничих розладів опорно-рухового апарату через специфічний характер праці та умов виробничого середовища, а ергономічні втручання дозволяють суттєво знизити ризики без значних капіталовкладень [38].

Механічна небезпека пов'язана з рухомими частинами сортувальних машин (привідними ременями, барабанами, роликівими транспортерами і пневматичними захватами). Защемлення кінцівок у зазорах між рухомими деталями трапляється найчастіше під час усунення затору качанів вручну без попереднього знеструмлення обладнання. Ключовим профілактичним заходом є виконання процедури блокування-маркування (lockout-tagout) перед будь-яким технічним втручанням. Разом з цим необхідно передбачити надійне огороження відкритих приводів, систему аварійного зупинення та достатнє освітлення робочої зони.

Комплексна система управління ризиками при сортуванні качанів насінневої кукурудзи має включати такі елементи: регулярний контроль рівнів шуму та концентрації пилу із занесенням результатів до карт умов праці, забезпечення операторів засобами індивідуального захисту такими як навушники або берушами класу не нижче 25 дБ, напівмасками з фільтрами класу P2 або P3; впровадження ергономічних допоміжних пристроїв (гідномних столів, нахилених лотків, регульованих за висотою конвеєрів); проведення вступного і повторного інструктажів з акцентом на процедурах блокування обладнання. У цілому, медичний моніторинг стану слухового та дихального апарату операторів повинен проводитися не рідше одного разу на рік.

Таким чином, безпека праці на сортувальних лініях насіннєвої кукурудзи є міждисциплінарною проблемою, розв'язання якої потребує узгоджених зусиль технологів, гігієністів праці та інженерів з охорони праці.

5.2 Екологічна експертиза

Виробництво насіннєвого матеріалу кукурудзи є одним із ключових напрямів аграрної галузі України. Розроблений у роботі пристрій для сортування качанів кукурудзи є малогабаритним механізованим засобом, що функціонує у польових умовах. Порівняно з великотоннажними промисловими сортувальними комплексами, пристрій характеризується суттєво меншим навантаженням на довкілля – нижчим рівнем шуму, мінімальним видоутворенням та відсутністю скидів рідких відходів.

Екологічна оцінка розробленого пристрою охоплює аналіз впливу на атмосферне повітря, ґрунт і водні ресурси, а також оцінку рівнів шуму та вібрації під час роботи установки. Додатково розглядаються заходи погодження з відходами, що утворюються в процесі сортування.

Основним джерелом забруднення атмосферного повітря під час роботи пристрою є пил рослинного походження, що виникає при переміщенні качанів по похилій поверхні, їх контакті з транспортером-дозатором та при роботі виконавчого механізму. Пил від качанів кукурудзи є органічним, нетоксичним і не належить до небезпечних речовин.

Концентрація пилу в зоні роботи пристрою не перевищує граничнодопустимі концентрації (ГДК) для органічного рослинного пилу, що становить 4 мг/м^3 . Це обумовлено низькою продуктивністю установки та конструктивними особливостями, які мінімізують виділення аерозольних часток. При роботі у польових умовах природна вентиляція додатково знижує локальну концентрацію пилу.

Пристрій не має двигуна внутрішнього згоряння і не є джерелом викидів продуктів горіння. Привід транспортера-дозатора здійснюється електричним двигуном або від зовнішнього джерела енергії, що повністю виключає викиди CO_2 , NO_x і вуглеводнів від самого пристрою.

Таблиця 3.1 – Характеристика джерел забруднення атмосферного повітря

Джерело виділення	Забруднювальна речовина	Клас небезпеки	ГДК, мг/м ³	Оцінка впливу
Транспортер-дозатор	Пил рослинний	IV	4,0	Незначний
Похила поверхня	Пил рослинний	IV	4,0	Незначний
Бункери	Пил рослинний	IV	4,0	Мінімальний
Електродвигун	Відсутні викиди	-	-	Відсутній

Робота пристрою для сортування качанів супроводжується шумовим та вібраційним впливом. Джерелами шуму є првідний механізм, переміщення качанів по металевих поверхнях та робота виконавчого механізму сортування.

Рівень звукового тиску в зоні обслуговування пристрою не перевищує 75 дБА, що відповідає вимогам для робочих місць на відкритому повітрі. Для порівняння: рівень шуму великих промислових термосортувальних комплексів становить 85–95 дБА, що значно перевищує допустимі норми без засобів захисту.

Вібраційний вплив пристрою класифікується як технологічна вібрація категорії 3б. Середньозвадратичні значення віброшвидкості не перевищують граничнодопустимих рівнів. Конструкція передбачає встановлення пристрою на ґрунтовій поверхні або дерев'яній платформі, що додатково поглинає вібраційні коливання.

Для зменшення шумового впливу на оператора рекомендується застосовувати засоби індивідуального захисту органів слуху - навушники або беруші - при тривалій роботі понад 4 години.

Пристрій для сортування качанів не використовує паливно-мастильні матеріали у відкритому вигляді та не має гідравлічних систем, що виключає ризик забруднення ґрунту нафтопродуктами. Єдиним потенційним джерелом забруднення ґрунту є мінімальна кількість мастила для змащування підшипникових вузлів привідного механізму.

Для змащування підшипників використовується пластичне мастило на основі літєвого мила, яке наноситься закрито і не контактує з ґрунтом або поверхнями

качанів. Маса мастила на одне технічне обслуговування не перевищує 50 г, що є мінімальним показником серед сільськогосподарських машин подібного класу.

Вплив пристрою на водні ресурси знехтує. Установка не передбачає використання води у технологічному процесі та не здійснює рідких скидів. Додатково з майданчика зберігання не містять шкідливих речовин і не потребують спеціального очищення.

Ущільнення ґрунту від роботи пристрою є мінімальним. Маса установки не перевищує 150 кг, а питомий тиск на ґрунт при встановленні на опорній платформі не перевищує 0,05 МПа, що не спричиняє деградації ґрунтового покриву.

У процесі сортування качанів кукурудзя утворюються відходи рослинного походження – листя обгортки, подрібнені частини качанів та пилоподібні частки органічного походження. За класифікацією зазначені відходи належать до IV класу небезпечності та не є токсичними.

Відходи сортування поділяються на дві основні фракції: нестандартні неочищені качани, що повертаються на повторну обробку або відраховуються на корм тваринам, та відходи обгортки – листя, яке є цінною органічною субстратом.

Переробка всіх рослинних відходів в межах господарства відповідає принципам замкнутого виробничого циклу та сприяє підвищенню родючості ґрунтів. Захоронення рослинних відходів сортування на полігонах твердих побутових відходів не допускається.

Для подальшого зниження екологічного навантаження від роботи пристрою рекомендується реалізація комплексу організаційно-технічних заходів:

- встановлення захисного кожуха над зоною переміщення качанів для локалізації пилу;
- використання тільки рекомендованих видів мастил у кількостях, передбачених технічним регламентом обслуговування;
- проведення технічного обслуговування пристрою на спеціально відведених майданчиках з твердим покриттям;
- організація роздільного збору відходів сортування безпосередньо на місці роботи установки.

- застосування оператором засобів індивідуального захисту органів дихання та слуху при тривалій роботі;
- регулярне технічне обслуговування приводного механізму для запобігання підвищеному шуму та вібрації;
- після завершення сезонних робіт очищення та консервація пристрою у закритому приміщенні.

Проведений аналіз екологічного впливу пристрою для сортування качанів кукурудзи дозволяє зробити такі висновки:

1. Пристрій належить до категорії машин з мінімальним екологічним навантаженням. Відсутність двигуна внутрішнього згоряння, гідравлічних систем та відкритих хімічних речовин робить його екологічно прийнятним для використання в умовах сільськогосподарських підприємств.

2. Рівні шуму та вібрації під час роботи пристрою не перевищують допустимих норм, що забезпечує безпечні умови праці для обслуговуючого персоналу.

3. Усі відходи, що утворюються в процесі сортування, є органічними нетоксичними речовинами IV класу небезпечності та повністю придатними для утилізації в межах сільськогосподарського підприємства без завдання шкоди довкіллю.

5. Пристрій відповідає вимогам чинного природоохоронного законодавства України та не потребує отримання спеціальних екологічних дозволів для введення в експлуатацію.

6. Реалізація запропонованих заходів мінімізації впливу додатково підвищить екологічну безпеку використання пристрою та відповідатиме принципам сталого розвитку аграрного виробництва.

5.3 Економічна ефективність розробки

Економічна ефективність запропонованої установки розраховували відповідно до методики визначення економічної ефективності технологій та сільськогосподарської техніки [35].

Методика економічної оцінки полягає у порівнянні розрахунків на основі існуючого очисника качанів ОП-15С та запропонованої установки.

Критерієм економічної оцінки було обрано мінімальну величину прямих експлуатаційних витрат на сортування качанів кукурудзи. Цей критерій відповідає основному показнику господарської діяльності в умовах ринкової економіки — максимальній величині чистого прибутку або чистого доходу.

Поставлене завдання зводиться до порівняння експлуатаційних витрат при використанні існуючого очисника качанів та запропонованої установки.

Ми розрахували основні техніко-економічні показники використання установки для сортування качанів та порівняли їх.

Результати розрахунку економічної ефективності представлено у вигляді таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Економічна ефективність установки для сортування качанів насінневої кукурудзи

Показник	Машина		ОП-15С + установка до ОП-15С + ТС 40С, %
	ОП-15С + ТС 40С	ОП-15С + установка	
1 Витрати праці, люд.-год.	0,68	0,484	140,5
2 Продуктивність праці, т/(особа/гол)	1,471	2,066	140,45
3 Зростання продуктивності праці, %	–	40,4	–
4 Експлуатаційні витрати, грн./т	17890	10230	57,18
зокрема:			
оплата праці	53,65	38,18	71,17
амортизація	9340	5336	57,13
ремонт та технічне обслуговування	8491	4851	57,13
електроенергія	4,37	3,12	71,40
інші витрати	2,35	1,53	65,11
5 Сезонна економія експлуатаційних витрат, грн.	–	11490	–

6 Додатковий капіталовкладення, грн.	–	56000	–
7 Термін окупності додаткових капіталовкладень, років	–	4,87	–
8 Коефіцієнт ефективності капіталовкладень	–	0,205	–
9 Нагелені витрати, грн./т	50650	37500	74,04
10 Енергоємність процесу, (кВт·год)/т	0,94	0,85	90,07

Висновки:

– експлуатаційні витрати на сортування качанів кукурудзи за допомогою розробленої установки зніжуються з 17 890 грн/т до 10 230 грн/т, тобто на 7 660 грн/т або на 42,82 %.

– додаткові капіталовкладення в модернізацію процесу сортування качанів окупаються за 4,87 року.

ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу технологій та засобів сортування качанів кукурудзи, а також особливостей їх біометричних і фізико-механічних властивостей, складено класифікацію та розроблено технічне рішення щодо установки для сортування, засноване на використанні фрикційних і спектральних властивостей качанів.

2. Теоретично обґрунтовано та досліджено процес взаємодії качанів кукурудзи з робочими органами у вигляді похилої поверхні зі змінною кривизною. В результаті аналіз отриманих залежностей встановлено, що нахил низхідної площини повинен бути не менше 40°, а початкова швидкість переміщення качана 0,25 – 0,35 м/с з швидкістю висхідної гілки не більше 100.

3. Розроблено методику кодового розпізнавання поверхонь качанів у обертливих листках та очищених від них за щільністю колірної гама. В якості характеристики обрано синій колір, показник інтенсивності якого для зерняток перевищує оберткові листки у 2,5 рази.

4. Розроблено установку для сортування качанів кукурудзи з транспортером-дозатором для поштучної подачі зі швидкістю 0,323 м/с, похилою поверхнею змінної кривизни, з кутом нахилу 30° та висотою 0,28 м на низхідній площині, кутом нахилу 10° і довжиною 0,5 м на висхідній площині, шириною 0,5 м, з блоком електронного розпізнавання за кольоровими кодами та виконавчим механізмом для направлення в бункери для очищених і неочищених качанів, що значно знижує використання ручної праці.

5. У результаті проведених лабораторних і польових досліджень встановлено, що як лабораторна, так і польова установки забезпечують розділення 99,3% очищених від неочищених качанів при швидкості подачі 0,323 м/с, що відповідає вихідним вимогам. Розділення качанів починається з покриття качанів під кутом охоплення листям від 120°. Качани з покриттям на 150° і більше всі виділяються як неочищені. Методом планування експерименту уточнено оптимальні параметри технологічного процесу розділення качанів зі ступенем очищення в межах швидкості до $v = 0,44$ м/с; кут нахилу висхідної поверхні до

$\beta = 7,54\%$; к-т охоплення качана об'ємною не більше $\alpha = 10,1\%$. Експлуатаційні витрати на сортування качанів кукурудзи за допомогою розробленої установки знижуються з 17 896 грн/т до 10 230 грн/т, тобто на 7 660 грн/т або на 42,82%, а додаткові капіталовкладення в модернізацію операції сортування качанів окупуваються за 4,87 року.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Mujbaile W., Raisadhar N., Deogade S., Dhanvijay A., Baldhare A., Dhurve R. Experimental Optimization of Corn Shelling Machine: A Review. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2023. Vol. 11, Issue 4. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.51122>
2. Byshov D. N., Petunina I. A., Kotelevskaya E. A., Borychev S. N., Rembalovich G. K. Substantiation of technical and operational characteristics of the device to shelling corn cobs. *BIO Web of Conferences*. 2020. Vol. 17. P. 00094. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700094>
3. Petunina I. A., Kotelevskaya E. A. A Classification Study of Biometric and Physico-Mechanical Properties of Cobs of Seed Corn. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018. Vol. 9, No. 5. P. 1631–1646. ISSN: 0975-8585. URL: [https://www.rjpbcs.com/pdf/2018_9\(5\)/\[205\].pdf](https://www.rjpbcs.com/pdf/2018_9(5)/[205].pdf)
4. Kruszelnicka W., Chen Z., Ambrose K. Moisture-Dependent Physical-Mechanical Properties of Maize, Rice, and Soybeans as Related to Handling and Processing. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 24. P. 8729. <https://doi.org/10.3390/ma15248729>
5. Zou Y., Fu J., Chen Z., Ren L. The effect of microstructure on mechanical properties of corn cob. *Micron*. 2021. Vol. 147. P. 103070. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2021.103070>
6. Gu B., Li L., Liang X., Wang Y., Fan T., Wang Y., Wang J. The ideal harvest time for seeds of hybrid maize (*Zea mays* L.) XY335 and ZD958 produced in multiple environments. *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. P. 17537. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16071-4>
7. Khatamov B. A., Fozilov G. G. Harvesting technology of the corn in the form of husked cobs and machine for its operation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1076. P. 012073. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1076/1/012073>
8. ДСТУ 4525:2006. Кукурудза. Технічні умови. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 14 с.

9. Truflyak E. I., Truflyak E. V., Sidorenko S. M. Multilevel Systematic Approach to Optimization of Corn Grain Harvesting, Transportation, Post-Harvesting Processing and Storage. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2016. Vol. 7, No. 2. P. 1426-1437. [https://www.rjpbs.com/pdf/2016_7\(2\)/\[47\].pdf](https://www.rjpbs.com/pdf/2016_7(2)/[47].pdf)
10. Ma X., Li Y., Wan L., Xu Z., Song J., Huang J. Classification of seed corn ears based on custom lightweight convolutional neural network and improved training strategies. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 120. P. 105936. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.105936>
11. Ma X., Li Y., Wan L., Liu Z., Song J., Zheng X., Fu Q. High-throughput maize seed ears sorting through structural re-parameterisation classification model and multi-channel sorting system. *Biosystems Engineering*. 2025. Vol. 254. P. 104155. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2025.104155>
12. Dai F., Zhao Y. M., Liu Y. X., Shi R. J., Xin S. L., Fu Q. F., Zhao W. Y. Analysis and performance test on dynamic seed corn threshing and conveying process with variable diameter and spacing. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2023. Vol. 16, No. 2. P. 259-266. <https://doi.org/10.25165/ijabe.20231602.7741>
13. Wang K. R., Xie K. Z., Ming B., Hou P., Xu J., Li S. K. Review of combine harvester losses for maize and influencing factors. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021. Vol. 14, No. 1. P. 1-10. <https://doi.org/10.25165/ijabe.20211401.6034>
14. Dai F., Zhao Y. M., Liu Y. X., Shi R. J., Xin S. L., Fu Q. F., Zhao W. Y. Analysis and performance test on dynamic seed corn threshing and conveying process with variable diameter and spacing. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2023. Vol. 16, No. 2. P. 259-266. <https://doi.org/10.25165/ijabe.20231602.7741>
15. Feng J. T., Yang Q. Y., Tian H., Wang Z. P., Tian S. J., Xu H. R. Promising real-time fruit and vegetable quality detection technologies applicable to manipulator picking process. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2024. Vol. 17, No. 2. P. 14-26. <https://doi.org/10.25165/ijabe.20241702.7678>

16. Ciqescu D., Nenciu F., Persu C., Găgeanu I., Gabriel G., Vlăduț N.-V., Matache M., Voicci I., Pruteanu A., Bularda M., Paraschiv G., Boruz S. I. Evaluation of an Optical Sorter Effectiveness in Separating Maize Seeds Intended for Sowing. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, № 15. P. 8892. <https://doi.org/10.3390/app13158892>

17. Blasco J., Aleixos N., Moltó E. Machine Vision system for Automatic Quality Grading of Fruit. *Biosystems Engineering*. 2003. Vol. 83, Issue 4. P. 415-423. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)90088-6](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)90088-6)

18. Zambono-Martinez, J. L., Calafate, C. T., Soler, D., & Cano, J.-C. (2017). Towards Realistic Urban Traffic Experiments Using DFROUTER: Heuristic, Validation and Extensions. *Sensors* 17(12), 2921. <https://doi.org/10.3390/s17122921>

19. Zhu S., Zhou J., Huang J. Design and Experiment of Seed Corn Ear Sorting System Based on Machine Vision. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2017. Vol. 48, Issue 10. P. 21-28. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.003>

20. Роговський І. Л., Тітова Л. Ш. Обґрунтування конструкторсько-технологічних параметрів обладнання для післязбиральної обробки качанів кукурудзи. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. 2018. Вип. 1 (22). С. 118-127.

21. Булгаков В. М., Адамчук В. В., Калетнік Г. М. Теоретичні дослідження руху частинки по похилій шорсткій площині, що здійснює поздовжньо-вертикальні коливання. *Вісник аграрної науки*. 2019. № 7. С. 45–53. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201902-07>

22. Li, X., Dai, B., Sun, H., & Li, W. (2019) Corn Classification System based on Computer Vision. *Symmetry*, 11(4), 591. <https://doi.org/10.3390/sym11040591>

23. Cubero, S., Aleixos, N., Moltó, E. et al. Advances in Machine Vision Applications for Automatic Inspection and Quality Evaluation of Fruits and Vegetables. *Food Bioprocess Technol* 4, 487–504 (2011). <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0411-8>

24. Плччо А. М., Акбаш К. С., Івнцова М. В. Математична статистика : навчальний посібник. Кропивницький : КОД, 2024. 220 с. <https://dspace.cusd.edu.ua/handle/123456789/5275>

25. Gillette S., Yin L., Kianian P. M. A., Pawlowski W. P., Chen C. Corn360: a method for quantification of corn kernels. *Plant Methods*. 2023. Vol. 19. № 23. <https://doi.org/10.1186/s13007-023-00995-2>.
26. Kienbaum L., Correa Abondano M., Blas F., Schmid K. DeepCob: precise and high-throughput analysis of maize cob geometry using deep learning with an application in genebank phenomics. *Plant Methods*. 2021. Vol. 17. № 88. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00737-6>.
27. Gillette S., Yin L., Kianian P. M. A., Pawlowski W. P., Chen C. Corn360: a method for quantification of corn kernels. *Plant Methods*. 2023. Vol. 19. № 23. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-023-00995-2>.
28. Elwakeel, A. E., Mazrou, Y. S. A., Tantawy, A. A., Okasha, A. M., Elmetwalli, A. H., Elsayed, S., & Makhlof, A. H. (2025). Designing, Optimizing, and Validating a Low-Cost, Multi-Purpose, Automatic System-Based RGB Color Sensor for Sorting Fruits. *Agriculture*, 13(9), 1824. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091824>
29. Tang H., Xu C., Wang Z., Wang Q., Wang J. Optimized Design, Monitoring System Development and Experiment for a Long-Belt Finger-Clip Precision Corn Seed Metering Device. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. P. 814747. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.814747>.
30. Feng, Y., Zhao, X., Fian, R., Liang, C., Liu, J., & Fan, X. (2024). Research on an Intelligent Seed-Sorting Method and Sorter Based on Machine Vision and Lightweight YOLOv5n. *Agronomy*, 14(9), 1953. <https://doi.org/10.3390/agronomy14091953>
31. Araújo, S. G., Peres, R. S., Barata J., Lidon, F., & Ramalho, J. C. (2021). Characterising the Agriculture 4.0 Landscape-Emerging Trends, Challenge, and Opportunities. *Agronomy*, 11(4), 667. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040667>
32. Nguyen L. L. P., Baranyai L., Nagy D., Mahajan P. V., Zsom-Muha V., Zsom T. Color analysis of horticultural produces using hue spectra fingerprinting. *MethodsX*. 2021. Vol. 8. P. 101594. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101594>.
33. Zhou S., Chai X., Yang Z., Wang H., Yang C., Sun T. Maize-IAS: a maize image analysis software using deep learning for high-throughput plant phenotyping. *Plant Methods*. 2021. Vol. 17. № 48. <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00747-0>.

34. Ashari M., Abbaspour-Gilandeh Y., Taghinezhad E., El Shal A. M., Hegazy R., Okasha M. Applying the Response Surface Methodology (RSM) Approach to Predict the Tractive Performance of an Agricultural Tractor during Semi-Deep Tillage. Agriculture. 2021. Vol. 11. № 11. P. 1043. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11111043>.

35. Тіхонов О. В., Рибалко І. М., Колпаченко Н. М. Техніко-економічна оцінка конструкторської розробки пристосування : методичні вказівки до виконання практичної роботи студентам, які навчаються за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування. Харків. нац. техн. ун-т сіл. госп-ва ім. П. Василенка, 2021. 22 с.